



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA E  
INDUSTRIAL**

**“MANIPULADOR ROBÓTICO DE SEIS GRADOS DE  
LIBERTAD CONFIGURACIÓN  
ANTROPOMÓRFICA”**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**INGENIERO MECATRÓNICO**

**PRESENTA:**

**PATRICIO MARTÍNEZ ZAMUDIO**

**DIRECTOR DE TESIS: ING SERAFIN CASTAÑEDA CEDEÑO**

**Ciudad Universitaria, Febrero de 2007**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Para mis padres con mucho  
cariño y respeto.

*Lucia y Patricio.*

Por su cariño y comprensión que  
me han brindado.

**Agradecimientos:**

**A mi tío el Ingeniero Alfredo Nieto Cabrera.**

**A la licenciada Margarita Domínguez.**

**Al Doctor Juan Ortega de la Rosa.**

**Al M.I. Ociel Flores Díaz.**

**Al Ingeniero Ulises Peñuelas Rivas.**

**Al Ingeniero Sergio Pérez Rodríguez.**

**Al Ingeniero Armando Alvarado.**

**A mis hermanos Hilda, Patricia, Jesús y Mauricio.**

# Contenido.

## Resumen.

### Capítulo 1. Introducción.

1.1 Antecedentes y etapas de evolución de la robótica.....	1
1.2 Fases más relevantes en el desarrollo de la Robótica industrial.....	2
1.3 Clasificación del Robot Industrial.....	3
1.4 Clasificación de los robots basada en la Asociación de Robots Japonesa.....	4
1.5 Configuraciones clásicas de los manipuladores.....	5
1.6 Tipos de articulaciones.....	6
1.7 Componentes básicos de un robot.....	7
1.8 Aplicaciones de los Robots.....	8
1.9 Nuevos Sectores de Aplicación.....	13

### Capítulo 2. Planteamiento del problema.

2.1 Importancia del tema.....	14
2.1.1 Definición del problema.....	15
2.2 Objetivo general.....	15
2.1.1 Objetivos específicos.....	15
2.2.1 Hipótesis.....	16
2.1.2 Alcances.....	16
2.3 Justificación del proyecto.....	16
2.4 Especificaciones.....	17
2.5 Consideraciones para el diseño del manipulador robótico.....	19

### Capítulo 3. Diseño conceptual.

3.1 Configuración y grados de libertad.....	20
3.2 Elementos mecánicos del manipulador robótico.....	22
3.2.1 Selección de materiales.....	23
3.2.1.1 Rendimiento y eficiencia de los materiales.....	23
3.2.1.2 Materiales a utilizar.....	26

3.2.2	Tipos de transmisiones.....	29
3.2.3.1	Procesos para la fabricación de engranes de sinfín.....	31
3.2.3.2	Conformación de dientes de engrane.....	31
3.2.3.3	Maquinado.....	31
3.3	Cojinetes.....	32
3.4	Parte electrónica.....	34
3.4.1	Actuadores.....	34
3.4.2	Actuadores eléctricos.....	34
3.4.2.1	Selección de los motores.....	35
3.5	Etapas de potencia.....	37
3.6	Sensores.....	39
3.6.1	Potenciómetro de Precisión (lineales).....	38
3.6.2	Sensor de límite de carrera o bumper y opto interruptor.....	39
3.7	Selección del microcontrolador.....	40

#### **Capítulo 4. Modelación cinemática**

4.1	Caracterización del manipulador robótico de 6GDL.....	42
4.2	Representación de la posición y orientación del manipulador robótico de 6GDL.....	43
4.3	Modelación cinemática directa del manipulador robótico.....	44
4.3.1	Método de Denavit-Hartenberg.....	47
4.4	Análisis cinemático inverso para el manipulador robótico.....	50
4.4.1	Expresión matemática del problema.....	50
4.4.2	Método Analítico.....	51
4.5	Jacobiano del manipulador robótico de 6GDL.....	56
4.5.1	Análisis del jacobiano.....	57
4.5.2	Análisis inverso del jacobiano.....	58
4.5.3	Análisis de singularidades del manipulador robótico.....	58

#### **Capítulo 5. Diseño a detalle.**

5.1	Elementos mecánicos.....	61
5.1.1	Análisis del efector final.....	61
5.1.1.1	Diseño del engrane de sinfín para el 4° grado de libertad.....	63

5.1.1.2	Diseño de la flecha soporte para el efector final (4° grado de libertad).....	66
5.1.1.3	Selección de rodamientos.....	70
5.1.2	Análisis del eslabón 2.....	70
5.1.2.1	Análisis de la solera para el eslabón 2.....	71
5.1.2.2	Diseño del engrane de sinfín para el segundo eslabón.....	72
5.1.2.3	Diseño de la flecha para el segundo eslabón 3 <sup>er</sup> grado de libertad.....	73
5.1.2.4	Selección de rodamientos.....	73
5.1.3	Análisis del eslabón 1.....	74
5.1.3.1	Análisis de la solera para los eslabones primarios.....	74
5.1.3.2	Diseño del engrane de sinfín para el primer eslabón.....	75
5.1.3.3	Diseño de la flecha soporte para el eslabón 1( 2° grado de libertad).....	76
5.1.4	Análisis de la Flecha para la base del manipulador robótico (1 <sup>er</sup> grado de libertad)..	76
5.1.4.1	Diseño del engrane de sinfín.....	77
5.1.4.2	Diseño de la flecha y selección de rodamientos.....	77
5.2	Dispositivos electrónicos.....	78
5.2.1	La computadora personal.....	78
5.2.2	Comunicación RS-232.....	78
5.2.2.1	Limitaciones de la comunicación RS-232.....	79
5.2.3	Utilización del microcontrolador PIC16F877.....	80
5.2.4	Actuadores.....	82
5.2.5	Etapas de potencia para los actuadores eléctricos.....	84
5.2.6	Fuentes de alimentación corriente directa.....	86
5.2.6.1	Fuente de alimentación conmutada.....	86
5.3	Control del manipulador robótico de 6GDL.....	88
5.4	Programación de movimientos del manipulador robótico.....	89
5.4.1	Especificaciones de las entradas y salidas.....	89
5.4.2	Diseño del programa para Visual Basic.....	90
5.4.3	Diseño y codificación del programa para el Microcontrolador.....	90

## **Capítulo 6. Construcción.**

6.1 Descripción de las piezas utilizadas.....	95
6.1.1 Base del manipulador robótico.....	95
6.1.2 Eslabón primario.....	97
6.1.3 Eslabón secundario.....	98
6.1.4 Efecto final.....	99
6.2 Descripción del manipulador robótico para la secuencia de una trayectoria....	102
6.3 Descripción del manipulador robótico para la simulación de taladrado.....	103
6.4 Descripción del manipulador robótico para la programación por guiado.....	103

## **Conclusiones y Resultados.**

6.5 Resultado del seguimiento de una trayectoria.....	105
6.6 Resultado de la simulación de taladrado .....	106
6.7 Resultados de la programación por guiado.....	108
6.8 Resultados de las especificaciones propuestas.....	108
6.9 Costos de materiales.....	109
6.10 Resultados obtenidos en la elaboración de este trabajo.....	110
6.11 Conclusiones.....	113

<b>Recomendaciones.....</b>	<b>115</b>
-----------------------------	------------

<b>Bibliografía.....</b>	<b>116</b>
--------------------------	------------

<b>Apéndice A Dibujos de los elementos mecánicos del manipulador robótico.....</b>	<b>118</b>
--	------------

<b>Apéndice B Diagrama “PCB” de la tarjeta de control de los microcontroladores.....</b>	<b>158</b>
--	------------

<b>Apéndice C Código fuente del programa para el manipulador robótico.....</b>	<b>160</b>
--	------------

---

**RESUMEN.**

En este trabajo de tesis se realiza el diseño, la modelación, el control y la construcción de un manipulador robótico de seis grados de libertad (6GDL). Para la parte mecánica se realizan los planos de los mecanismos en el software denominado Solid Edge. Se diseñó a la transmisión mecánica de engrane de sinfín o sinfín corona, que permite a los mecanismos moverse con la mayor precisión posible y que pueda levantar una carga aproximada de  $3[Kg]$ . Se obtiene el diámetro adecuado de las flechas, de ahí se parte para seleccionar los rodamientos requeridos. Se seleccionaron los actuadores que generan la potencia necesaria para mover a los mecanismos. Así como el material para la elaboración del prototipo.

En la parte eléctrica se diseñó una tarjeta que contiene a seis microcontroladores, para poder mover al manipulador robótico, permitiendo una comunicación de la PC al microcontrolador, por el puerto serial RS-232. Como sensores se utilizaron potenciómetros lineales, para conocer la posición angular de los eslabones los cuales están acoplados al final de las flechas. Se utilizan también sensores mecánicos conocidos como finales de carrera. Para las etapas de potencia se adquirieron tres módulos que manejan seis actuadores.

La programación del microcontrolador se realizó en lenguaje C. El microcontrolador envía los movimientos que se requieren a los actuadores y establece la comunicación con la PC por medio del puerto serial. Se realizó un programa en Visual Basic en un ambiente gráfico, con un panel visual.

Se realizó el análisis de la cinemática inversa, obteniendo así las ecuaciones que rigen el movimiento de las articulaciones del manipulador robótico. Se construye el prototipo del manipulador robótico de seis grados de libertad y se observa su comportamiento. Logrando mover sus seis articulaciones.

# Capítulo 1.

## Introducción.

En este capítulo se realiza una breve reseña de la evolución de los robots, se mencionan las clasificaciones más importantes de los robots industriales, las configuraciones básicas que existen en la actualidad, así como los componentes básicos con los que debe contar un robot.

### 1.1 Antecedentes y etapas de evolución de la robótica.

La idea de los brazos robóticos datan de varios años atrás tal es el ejemplo de los antiguos egipcios que unieron brazos mecánicos a las estatuas de sus dioses. Estos brazos fueron operados por sacerdotes. Los griegos construyeron estatuas que operaban con sistemas hidráulicos, los cuales se utilizaban para fascinar a los adoradores de los templos.

La palabra robot surge con la obra RUR, "Robots Universales de Rossum" de Carel Capee, es una palabra checoslovaca que significa trabajador, sirviente. Entre los escritores de ciencia ficción, Isaac Asimov<sup>1</sup>, contribuyó con varias narraciones relativas a robots, comenzó en 1939, a él se le atribuye el acuñamiento del término Robótica. La imagen de robot que aparece en su obra es el de una máquina bien diseñada y con una seguridad garantizada que actúa de acuerdo con tres principios.

Estos principios fueron denominados por Asimov las Tres Leyes de la Robótica, y son:

1. Un robot no puede actuar contra un ser humano o, mediante la inacción, que un ser humano sufra daños.
2. Un robot debe de obedecer las órdenes dadas por los seres humanos, salvo que estén en conflictos con la primera ley.
3. Un robot debe proteger su propia existencia, a no ser que esté en conflicto con las dos primeras leyes.

Los robots se clasifican de acuerdo a cinco generaciones las cuales son las siguientes:

---

<sup>1</sup> Asimov, Isaac. "I, robot". 1950

- **Robots de 1ª Generación.** El sistema de control usado en la primera generación de robots esta basado en la “paradas fijas” mecánicamente. Como ejemplo de esta primera etapa están los mecanismos de relojería que mueven las cajas musicales o los juguetes de cuerda.
- **Robots de 2ª Generación.** El movimiento se controla a través de una secuencia numérica almacenada en disco o cinta magnética. Por regla general, este tipo de robots se utiliza en la industria automotriz y son de gran tamaño.
- **Robots de 3ª Generación.** Utilizan las computadoras para su control y tienen cierta percepción de su entorno a través del uso de sensores. Con esta generación se inicia la era de los robots inteligentes y aparecen los lenguajes de programación para escribir los programas de control.
- **Robots de 4ª Generación.** Se trata de robots altamente inteligentes con más y mejores extensiones sensoriales, para entender sus acciones y captar el mundo que los rodea.
- **Robots de 5ª Generación.** Actualmente en desarrollo. Esta nueva generación de robots basará su acción principalmente en modelos conductuales establecidos.

### 1.2 Fases más relevantes en el desarrollo de la Robótica industrial.

1. El laboratorio ARGONNE, diseña, en 1950, manipuladores amo-esclavo para manejar material radioactivo.
2. UNIMATION, fundada en 1958 por Engelberger y hoy absorbida por Whestinghouse, realiza los primeros proyectos de robots a principios de la década de los sesentas de nuestro siglo, instalando el primero en 1961 y posteriormente, en 1967, un conjunto de ellos en una factoría de General Motors. Tres años después, se inicia la implantación de los robots en Europa, especialmente en el área de fabricación de automóviles. Japón comienza a implementar esta tecnología hasta 1968.
3. Los laboratorios de la Universidad de Stanford y del MIT acometen, en 1970, la tarea de controlar un robot mediante computador.
4. En el año de 1975, la aplicación del microprocesador, transforma la imagen y las características del robot, hasta entonces grande y costoso.

5. A partir de 1980, el fuerte impulso en la investigación, por parte de las empresas fabricantes de robots, otros auxiliares y diversos departamentos de Universidades de todo el mundo, sobre la informática aplicada y la experimentación de los sensores, cada vez más perfeccionados, potencian la configuración del robot inteligente capaz de adaptarse al ambiente y tomar decisiones en tiempo real, adecuarlas para cada situación.

### 1.3 Clasificación del Robot Industrial.

**Manipuladores.** Son sistemas mecánicos multifuncionales, con un sencillo sistema de control, que permite gobernar el movimiento de sus elementos, de los siguientes modos:

- **Robots de repetición o aprendizaje.** Son manipuladores que se limitan a repetir una secuencia de movimientos, previamente ejecutada por un operador humano, haciendo uso de un controlador manual o un dispositivo auxiliar.
- **Robots con control por computador.** Son manipuladores o sistemas mecánicos multifuncionales, controlados por un computador, que habitualmente suele ser un microordenador. Las grandes ventajas que ofrecen este tipo de robots, hacen que se vayan imponiendo en el mercado rápidamente, lo que exige la preparación urgente de personal cualificado, capaz de desarrollar programas similares a los de tipo informático.
- **Robots inteligentes.** Son similares a los del grupo anterior, pero además, son capaces de relacionarse con el mundo que les rodea a través de sensores y tomar decisiones en tiempo real (auto programable).
- **Micro-robots.** Con fines educacionales, de entretenimiento o investigación, existen numerosos robots de formación o micro-robots a un precio muy asequible cuya estructura y funcionamiento son similares a los de aplicación industrial.
- **Robots de Servicio y Teleoperador.** En cuanto a los robots de servicio, se pueden definir como: Dispositivos electromecánicos móviles o estacionarios, dotados normalmente de uno o varios brazos mecánicos independientes, controlados por un programa ordenador y que realizan tareas no industriales de servicio.

- **Telerobots.** Los robots tele operados son definidos por la NASA como: Dispositivos robóticos con brazos manipuladores y sensores con cierto grado de movilidad, controlados remotamente por un operador humano de manera directa o a través de un ordenador

### **1.4 Clasificación de los robots basada en la Asociación de Robots Japonesa.**

Otro tipo de clasificación que existe es la que se basa en la Asociación de Robots Japonesa (JIRA), en la cual la clasificación es de acuerdo al nivel de inteligencia.

1. Dispositivos de manejo manual, controlados por una persona.
2. Robots de secuencia arreglada.
3. Robots de secuencia variable, donde un operador puede modificar la secuencia fácilmente.
4. Robots regeneradores, donde el operador humano conduce el robot a través de la tarea.
5. Robots de control numérico, donde el operador alimenta la programación del movimiento, hasta que se enseñe manualmente la tarea.
6. Robots inteligentes, los cuales pueden entender e interactuar con cambios en el medio ambiente.

Los programas en el controlador del robot pueden ser agrupados de acuerdo al nivel de control que realizan. Nivel de inteligencia artificial, donde el programa aceptará un comando como "levantar el producto" y descomponerlo dentro de una secuencia de comandos de bajo nivel basados en un modelo estratégico de las tareas.

De lo cual se puede mencionar lo siguiente:

- A. Nivel de modo de control. Los movimientos del sistema son modelados, se incluye la interacción dinámica entre los diferentes mecanismos, trayectorias planeadas, y los puntos de asignación seleccionados.
- B. Niveles de servosistemas. Los actuadores controlan los parámetros de los mecanismos con el uso de una retroalimentación interna de los datos obtenidos por los sensores, y la ruta es modificada sobre la base de los datos que se obtienen de sensores externos.

En la clasificación final se considerara el nivel del lenguaje de programación. La clave para una aplicación efectiva de los robots para una amplia variedad de tareas, es el desarrollo de lenguajes de alto nivel. Existen muchos sistemas de programación de robots, aunque la mayoría del software más avanzado se encuentra en los laboratorios de investigación. Los sistemas de programación de robots caen dentro de tres clases:

1. Sistemas guiados, en el cual el usuario conduce el robot a través de los movimientos a ser realizados.
2. Sistemas de programación de nivel-robot, en los cuales el usuario escribe un programa de computadora al especificar el movimiento y el sensado.
3. Sistemas de programación de nivel-tarea, en el cual el usuario especifica la operación por sus acciones sobre los objetos que el robot manipula.

### 1.5 Configuraciones clásicas de los manipuladores.

La estructura del manipulador y la relación entre sus elementos proporcionan una configuración mecánica, que da origen al establecimiento de los parámetros que hay que conocer para definir la posición y orientación del elemento terminal.

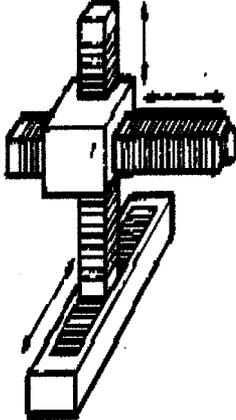
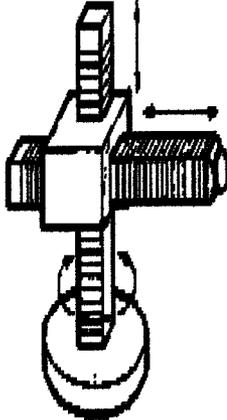
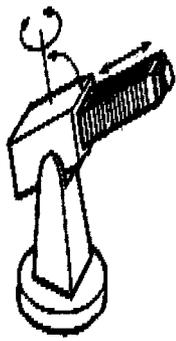
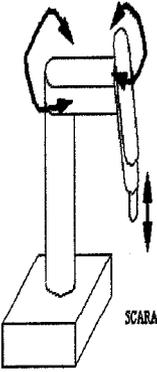
Fundamentalmente, existen cinco estructuras clásicas en los manipuladores, que se relacionan con los correspondientes modelos de coordenadas, en el espacio y que se citan a continuación.

- I. Cartesiano / Rectilíneo. El posicionando se hace en el espacio de trabajo con articulaciones prismáticas. Esta configuración se usa bien cuando un espacio de trabajo es grande y debe cubrirse, o cuando la exactitud consiste en la espera del robot. (Ver tabla 1.1).
- II. Cilíndrico. El robot tiene un movimiento de rotación sobre una base, una articulación prismática para la altura, y una articulación prismática para el radio. Este robot satisface bien a los espacios de trabajo redondos. (Ver tabla 1.1).
- III. Esférico. El robot tiene dos articulaciones de rotación y una prismática, permiten al robot apuntar en muchas direcciones, y entonces se extiende el efector final, a un poco de la distancia radial. (Ver tabla 1.1).

IV. Articulado / Articulado Esférico / Rotación. El robot usa tres articulaciones de rotación para posicionar el robot. Generalmente el volumen de trabajo es esférico. En estos tipos de robots, la mayoría se parecen al brazo humano, ya que cuentan con una cintura, el hombro, el codo y la muñeca. (Ver tabla 1.1).

V. Scara. (Brazo de Complacencia Selectivo para el ensamble) - Este robot conforma a las coordenadas cilíndricas, pero el radio y la rotación se obtiene por uno o dos eslabones del planar con las articulaciones de rotación. (Ver tabla 1.1).

Tabla 1.1 Configuraciones básicas

				
<p>Arquitectura mecánica cartesiana.</p>	<p>Arquitectura mecánica cilíndrica.</p>	<p>Arquitectura mecánica esférica.</p>	<p>Arquitectura mecánica antropomórfica</p>	<p>Arquitectura mecánica Scara.</p>

### 1.6 Tipos de articulaciones

Se define como articulación a un punto, línea o área entre dos cuerpos que pueden o no tener movimiento relativo entre ellos. Las articulaciones que permiten movimiento se llaman pares cinemáticos. Se tienen seis tipos diferentes de pares cinemáticos posibles los cuales se muestran en la figura 1.1

Se propone a la articulación rotacional y a la prismática para la construcción del brazo robótico, debido a que a raíz de estas se derivan las cuatro restantes.

Figura	Tipo de articulación	Grados de libertad	Características
	Rotacional	1	Consiste en una rotación alrededor del eje de la articulación.
	Prismática	1	Consiste en una traslación a lo largo del eje de la articulación.
	Cilíndrica	2	Existen dos grados de libertad una rotación y una traslación.
	Plana	2	Se caracteriza por el movimiento de desplazamiento en un plano
	Esférica	2	Combina tres giros en tres direcciones perpendiculares en el espacio.
	Helicoidal	1	Es parecido a la articulación prismática solo que su desplazamiento es parecido al de un tornillo

Figura 1.1 Tipos de articulaciones.

### 1.7 Componentes básicos de un robot.

La evolución de los robots industriales desde sus principios ha sido vertiginosa. En poco más de 30 años las investigaciones y desarrollos sobre robótica industrial han permitido que los robots tomen posiciones en casi todas las áreas productivas y tipos de industria. En pequeñas o grandes fábricas, los robots pueden sustituir al hombre en aquellas áreas repetitivas y hostiles, adaptándose inmediatamente a los cambios de producción solicitados por la demanda variable.

Los componentes básicos de un brazo robótico son:

- a. La estructura - la estructura mecánica (los eslabones, base, efector final). Esto exige mucha masa, para proporcionar la rigidez bastante estructural para asegurar la exactitud mínima bajo las cargas útiles variadas.
- b. Actuadores - Los motores, los cilindros, las articulaciones del robot. Esto también podría incluir los mecanismos para una transmisión.
- c. Control a la Computadora - Esta computadora une con el usuario, y a su vez los mandos las articulaciones del robot.

- d. El extremo de Brazo que labora con una herramienta (efector final) - La programación que proporciona el usuario se diseña para las tareas específicas.
- e. El movimiento de cada articulación puede ser de desplazamiento, de giro, o de una combinación de ambos. Cada uno de los movimientos independientes que puede realizar cada articulación con respecto a la anterior, se denomina grado de libertad. El número de grados de libertad del robot viene dado por la suma de los grados de libertad de las articulaciones que lo componen.

### **1.8 Aplicaciones de los Robots.**

El desarrollo del brazo artificial multiarticulado o manipulador llevó a la realidad el robot fabril actual. En 1954 el estadounidense George Devol inventó un brazo primitivo que se podía programar para realizar algunas tareas. En 1975, el ingeniero mecánico estadounidense Víctor Scheinman, cuando estudiaba la carrera en la Universidad de Stanford, en California, desarrolló un manipulador polivalente realmente flexible conocido como Brazo Manipulador Universal Programable (PUMA, en inglés).

El PUMA era capaz de mover un objeto y colocarlo en cualquier orientación en un lugar deseado que estuviera a su alcance. El concepto básico de multiarticulación del PUMA es la base de la mayoría de los robots actuales.

La Federación Internacional de la Robótica (IFR) estableció en 1998 una clasificación de las aplicaciones de la Robótica en el sector manufacturero, las cuales son:

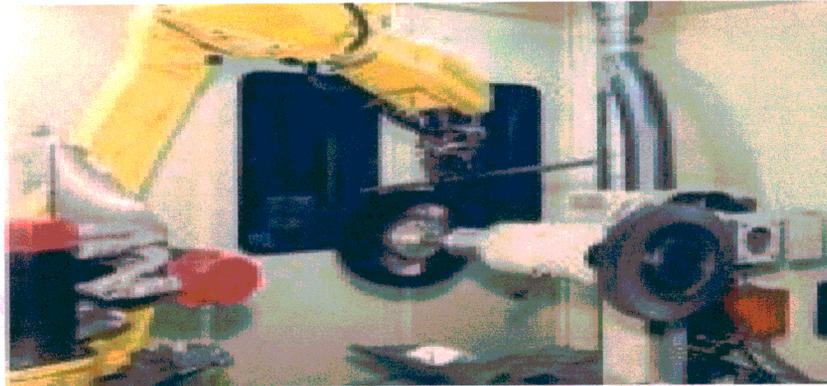
#### **1. Manipulación en fundición.**

Las cargas manejadas por los robots en estas tareas suelen ser medias o altas, no se necesita una gran precisión y su campo de acción es grande. Su estructura más frecuente es la polar y la articular, su sistema de control es por lo general sencillo.

#### **2. Manipulación en moldeos de plásticos.**

#### **3. Manipulación en tratamientos térmicos.**

#### **4. Manipulación en la forja y estampación.**



**Figura 1.2** Robot para moldes de fundición.

### **5. Soldadura.**

La gran demanda de robots para la tarea de soldadura por puntos ha originado que los fabricantes desarrollen robots especiales para esta aplicación que integran en su sistema de programación el control de la pinza de soldadura que portan en su extremo.

Los robots de soldadura por puntos precisan capacidad de cargas del orden de los 50-100 Kg. y estructura articular, con suficientes grados de libertad (5 o 6) como para posicionar y orientar la pinza de soldadura (o pieza según el caso) en lugares de difícil acceso.



**Figura 1.3** Robot de soldadura.

Tipos de robots de soldadura.

- a. Al arco.
- b. Por puntos.
- c. Por gas.
- d. Por láser.

## 6. Aplicación de materiales.

Normalmente los robots de pintura son específicos para este fin. Suelen ser robots articulares, ligeros, con seis o más grados de libertad que les permiten proyectar pintura en todos los huecos de la pieza. Cuentan con protecciones especiales para defenderse de las partículas en suspensión dentro de la cabina de pintura y sus posibles consecuencias (explosiones, incendio, deterioro mecánico).

Este mismo motivo origina que, en muchos casos, el accionamiento de los robots de pintura sea hidráulico, de ser eléctrico los cables deben de ir por el interior de ductos, sobre presión, evitándose así, el riesgo de explosión.

Tipos de robots de aplicación de materiales:

- a. Pintura
- b. Adhesivos y secantes



Figura 1.4 Robot de pintura.

## 7. Mecanización

- a. Carga y descarga de máquinas
- b. Corte mecánico, rectificado, desbardado y pulido

Los robots empleados en corte precisan control de trayectoria continua y elevada precisión. Su campo de acción varía con el tamaño de las piezas a cortar, siendo en general de envergadura media (de 1 a 3 metros de radio). En este sentido, con mucha frecuencia se dispone al robot suspendido boca abajo sobre la pieza.

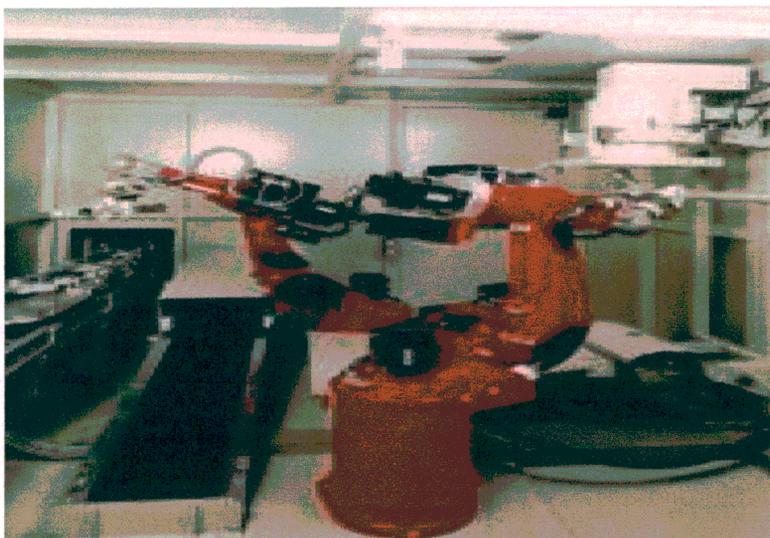


Figura 1.5 Robot de corte.

**8. Otros procesos de robots de corte.**

- a. Láser.
- b. Chorro de agua.

**9. Montaje.**

- a. Montaje mecánico.
- b. Inserción.
- c. Unión por adhesivos.
- d. Unión por soldadura.
- e. Manipulación para montaje.

El tipo SCARA ha alcanzado gran popularidad en este tipo de tareas por su bajo costo y buenas características. Estas se consiguen por su adaptabilidad selectiva, presentando facilidad para desviarse, por una fuerza externa, en el plano horizontal y una gran rigidez para hacerlo en el eje vertical.

También se usan con frecuencia robots cartesianos por su elevada precisión y, en general, los robots articulares que pueden resolver muchas de estas aplicaciones con suficiente efectividad.

**10. Manipulación de materiales.**

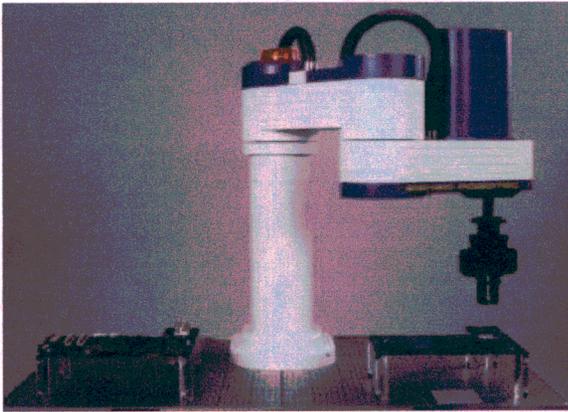


Figura 1.6A Robot Scara

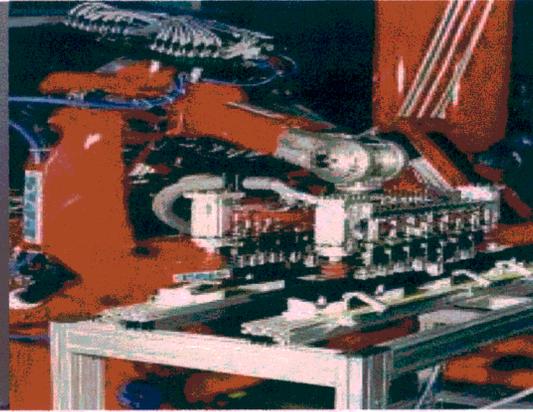


Figura 1.6B Robot articulado.

### 11. Paletización.

Generalmente, las tareas de paletización implican el manejo de grandes cargas, de peso y dimensiones elevadas. Por este motivo, los robots empleados en este tipo de aplicaciones acostumbran a ser robots de gran tamaño, con una capacidad de carga de 10 a 100[Kg] El robot podrá ir equipado con una serie de ventosas de vacío y su capacidad de carga estaría entorno a los 50[Kg]



Figura 1.7 Robot de paletización.

### 12. Medición, inspección, control de calidad

El robot industrial puede participar en esta tarea usando su capacidad de posicionamiento y manipulación. Así, transportando en su extremo un palpador, puede realizar el control dimensional de piezas ya fabricadas. Para ello el robot toca con el palpador varios puntos claves de la pieza.

### **1.9 Nuevos Sectores de Aplicación**

La competitividad del robot frente a otras soluciones de automatización se justifica por su rápida adaptación a series cortas, sus buenas características de precisión y rapidez, y por su posible reutilización con costos inferiores. Sin embargo, existen otros sectores donde no es preciso conseguir elevada productividad, en los que las tareas a realizar no son repetitivas, y no existe un conocimiento detallado del entorno.

Entre estos sectores podría citarse la industria nuclear, la construcción, la medicina o el uso doméstico. En ninguno de ellos existe la posibilidad de sistematizar y clasificar las posibles aplicaciones, pues estas responden a soluciones aisladas a problemas concretos. Este tipo de robots ha venido a llamarse robots de servicio y pueden ser definidos como:

Un dispositivo electromecánico, móvil o estacionario, con uno o más brazos mecánicos, capaces de acciones independientes.

De entre los cuales destacan:

- a. Agricultura y selvicultura.
- b. Ayuda a discapacitados.
- c. Construcción.
- d. Domésticos.
- e. Entornos peligrosos.
- f. Espacio.
- g. Medicina y salud.
- h. Minería.
- i. Submarino.
- j. Vigilancia y seguridad.

## Capítulo 2.

# Planteamiento del problema.

En este capítulo se menciona la importancia de diseñar y construir mecanismos funcionales, los objetivos de este trabajo de tesis, así como las especificaciones que tendrá el manipulador robótico motivo de estudio.

### 2.1 Importancia del tema.

En México implantar un robot en la industria es demasiado costoso (se estima aproximadamente U\$ 70, 000 [FANUC, 2006]), por lo que los únicos que están al alcance de estos avances tecnológicos son las grandes industrias, principalmente la industria automotriz, que lleva cerca de 30 años con esta tecnología, dejando a un lado a las medianas y aun más a las pequeñas industrias, por lo que las pequeñas industrias no pueden competir y por consiguiente no pueden tener un desarrollo tecnológico favorable.

Debido a que son más las pequeñas industrias que existen en México, se debe de apoyar con la aplicación de la ingeniería a este sector, una forma es diseñar, manufacturar e implantar en el país, la maquinaria o los mecanismos necesarios que se requieran para satisfacer las necesidades que se necesiten cubrir en el sector industrial, con lo cual se pretende construir un manipulador robótico para realizar actividades didácticas, con el fin de exponer su funcionamiento.

Es cierto que no todas las industrias necesitan un manipulador robótico, pero con este trabajo de tesis también, se pretende que pueda ser material de apoyo para futuras generaciones, para el diseño y creación de mecanismos funcionales. Con lo cual teniendo un primer prototipo se podrán observar los detalles que siempre surgen en un proceso de diseño, para que en una segunda etapa este trabajo pueda ser tomado y mejorado conociendo los detalles que surgen a la hora de implementar los mecanismos. Y así aplicar la ingeniería para poder desarrollar mecanismos capaces de satisfacer las necesidades de las pequeñas industrias del país.

### 2.1.1 Definición del problema.

Se pretende construir el prototipo de un manipulador robótico de estructura antropomórfica con seis grados de libertad (6GDL), de movimientos independientes, capaz de levantar una carga de tres kilos en sus primeras tres articulaciones, que sea de forma robusta, el cual pueda ser controlado por medio de un computadora. Como efector final tendrá un mecanismo en forma de pinza y podrá ser intercambiable por una herramienta rotatoria, se probará su funcionamiento con el seguimiento de una trayectoria y la simulación de un proceso de taladrado.

Como restricciones se deben tomar en cuenta los siguientes puntos:

1. El manipulador robótico será de seis grados de libertad (6GDL) del tipo rotacional-rotacional, de una configuración antropomórfica.
2. El movimiento de cada junta rotacional es independiente de las demás.
3. El espacio de trabajo es en el plano XYZ.
4. Cuenta con seis grados de libertad de juntas rotacionales.
5. Su capacidad de carga es de 3Kg.
6. El efector final tiene forma de pinza con una articulación prismática, para abrir y cerrar el mecanismo que forma a esta.
7. El control para la posición de los eslabones es de malla cerrada. Para lo cual se utilizan potenciómetros lineales, acoplados en cada junta rotacional.
8. El manipulador robótico tiene que ser de forma robusta.
9. La trayectoria a realizar será preestablecida y programada.
10. Realizará la simulación de taladrado de piezas pequeñas.
11. El efector final podrá ser intercambiable por alguna herramienta rotatoria.

### 2.2 Objetivo general.

Diseñar, construir y probar el funcionamiento de un manipulador robótico de seis grados de libertad de configuración antropomórfica, para realizar demostraciones de movimientos para fines didácticos, el cual seguirá una trayectoria que el usuario le indicara por medio de una PC y simulará un proceso industrial.

### 2.2.1 Objetivos específicos

1. Selección y construcción de las transmisiones mecánicas del manipulador robótico.
2. Selección de los motores para cada articulación.
3. Diseñar las etapas de potencia adecuadas para los motores seleccionados.
4. Diseñar una tarjeta de control la cual permita establecer una comunicación entre el manipulador robótico y la PC.
5. Modelación cinemática directa e inversa del robot en estudio.
6. Realización de un programa visual en una PC, que permita al usuario dar instrucciones al manipulador robótico.
7. Construir un manipulador robótico de seis grados de libertad de configuración antropomórfica y probar su funcionamiento.

### 2.2.2 Hipótesis

Es posible construir un robot de seis grados de libertad con programación de movimientos desde una PC, el cual pueda ser aplicado en actividades de docencia y posiblemente en una aplicación industrial, con componentes de bajo costo.

### 2.2.3 Alcances

Realizar el estudio de la cinemática inversa para obtener las ecuaciones que permiten mover al manipulador robótico a la posición que se desea. Una vez que se tienen las ecuaciones se realiza la interpretación de estas para poderlas aplicar tanto en el microcontrolador como en el programa visual de la PC, logrando entablar la comunicación entre el usuario y el manipulador robótico

## 2.3 Justificación del proyecto

Es cierto que hay una gran gama de manipuladores robóticos, que hay empresas extranjeras (Fanuc, Mitsubishi, Festo, entre otros) muy importantes que se dedican a la producción en serie de manipuladores robóticos, pero lo importante de este trabajo de tesis es como poder solucionar el problema para la construcción y el buen funcionamiento del prototipo del

manipulador robótico de 6GDL, que en un futuro se espera pueda tener éxito en la industria y sea de carácter mexicano.

Es por eso que se realiza el análisis matemático de un manipulador robótico de seis grados de libertad de configuración antropomórfica, el análisis de la generación de trayectorias, la programación y el desarrollo de dispositivos electrónicos. Debido a que una vez teniendo el control del mismo, con una buena estabilidad mecánica respaldada por los modelos matemáticos y un buen programa soportado por microcontroladores, se podrán realizar pruebas de una forma segura.

### **2.4 Especificaciones.**

Para poder desarrollar este proyecto se deben de conocer las características más relevantes propias del manipulador robótico.

Se propone un manipulador robótico de seis grados de libertad, de articulaciones rotacionales, el cual debe de tener una base rígida para darle estabilidad a todo el mecanismo, contara con tres eslabones para formar la cadena cinemática abierta, tomando en cuenta que el efector final podrá ser intercambiable por alguna herramienta rotatoria, contara con movimientos independientes, con lo cual constara de seis motores para mover cada articulación, mas el motor para accionar al efector final. La herramienta rotaria será una herramienta prefabricada y adaptada con una broca.

Para este trabajo de tesis no se toman en cuenta el análisis dinámico, debido a que las velocidades de las juntas rotacionales son lentas. Tampoco se considera el perfil de velocidad, ya que las distancias que recorrerá cada junta rotacional son pequeñas.

Se realizan las etapas de potencia adecuadas para cada actuador. Así como seleccionar un microcontrolador que será el encargado de entablar la comunicación entre la PC y el usuario. Para poder definir con mayor precisión acerca de lo que se quiere realizar, hay que tomar en cuenta las especificaciones de la tabla 2.1.

**Tabla 2.1 Especificaciones para el diseño del manipulador robótico**

<b>Especificaciones</b>	<b>Capacidad</b>	<b>Definición</b>
Grados de libertad	6 del tipo rotacional	Son los parámetros que se precisan para <b>determinar la posición</b>
Capacidad de carga de los eslabones 3 primeros eslabones	3 Kg	El peso, en kilogramos, que puede transportar
Capacidad de carga contando al efector final	1 Kg	El peso, en kilogramos, que puede transportar el efector final
Velocidad	Entre 4 y 5 rpm.	<b>Para cada articulación se toma la velocidad angular de cada junta rotacional</b>
Costo máximo de los componentes comerciales	\$ 15,000.00	Como cantidad máxima para la elaboración del prototipo
Alcance	700 mm	Distancia que debe cubrir el manipulador cuando se encuentre totalmente extendido
Base rígida	1 pieza.	Para tener estabilidad
Materiales para los eslabones, flechas y elementos de sujeción	Ligeros	Debe de ser un material resistente, ligero y fácil de maquinar

**2.5 Consideraciones para el diseño del manipulador robótico.**

Hay que tomar en cuenta que las dimensiones de los elementos del manipulador, junto a los grados de libertad, definen la zona de trabajo del robot, que es una característica fundamental en las fases de selección e implantación del modelo para establecer la configuración más adecuada.

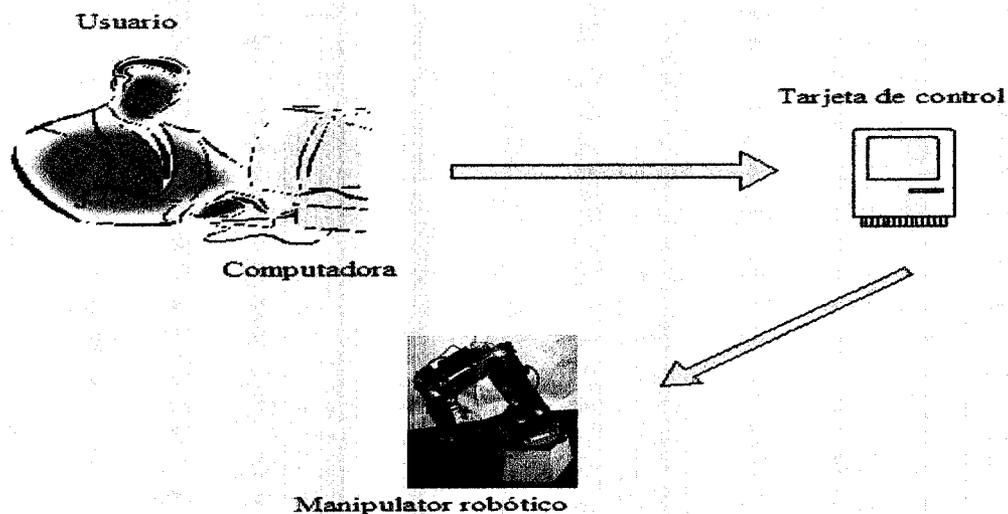
La zona de trabajo se subdivide en áreas diferenciadas entre sí, por la accesibilidad específica del elemento terminal, es diferente la posición que permite orientarlo verticalmente o con el determinado ángulo de inclinación.

Queda restringida la zona de trabajo por los límites de giro y desplazamiento que existen en las articulaciones que en este caso serán de tipo rotacional.

Puesto que para posicionar y orientar un cuerpo de cualquier manera en el espacio son necesarios seis parámetros, tres para definir la posición y tres para la orientación, si se pretende que un robot posicione y oriente su extremo (y con el la pieza o herramienta manipulada) de cualquier modo en el espacio, se precisara al menos seis grados de libertad.

Para este trabajo de tesis se utilizarán seis articulaciones del tipo rotacional, y una prismática para el caso del efector final. Teniendo así los seis grados de libertad que se requieren para poder posicionar al manipulador robótico según se desee.

Se describe brevemente en un diagrama de bloques las partes que compondrán al manipulador robótico. Iniciando con el usuario, el cual podrá accionar al manipulador por medio de la PC. La PC envía la información a la tarjeta de control que contiene a los microcontroladores, que a su vez acciona a los actuadores de cada articulación del manipulador.



**Figura 2.1** Esquema general del manipulador robótico.

# Capítulo 3.

## Diseño conceptual.

En este capítulo se toman en cuenta las especificaciones del manipulador robótico para realizar el diseño conceptual de una configuración antropomórfica con seis grados de libertad (6GDL), con lo cual se analizará que tan conveniente es realizar este tipo de configuración además de analizar las diferentes alternativas que se tienen para cumplir con los objetivos.

### 3.1 Configuración y grados de libertad

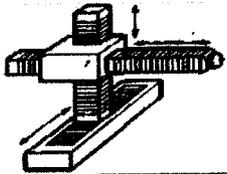
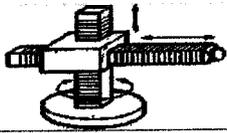
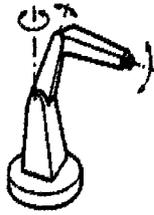
Tomando en cuenta las especificaciones mencionadas en el capítulo anterior de la tabla 2.1, se debe de proponer un modelo. Como primer paso se parte de la etapa de diseño mecánico, puesto que es necesario tener esta parte definida para posteriormente seguir con la etapa de diseño electrónico, y por último la de control y software.

El mecanismo estará formado por una cadena cinemática abierta con tres eslabones más el efector final, contará con una base rígida capaz de sostener a todo el sistema. El efector final podrá ser intercambiable y su orientación consta de tres grados de libertad. Se selecciono una configuración antropomórfica, tomando las consideraciones de la tabla 3.1.

La mayoría de las aplicaciones industriales requieren manipuladores de 6 grados de libertad, como lo son en el caso de soldadura, mecanizado y paletización, otros procesos más complejos reciben un numero mayor de grados de libertad, tal es el caso en las labores de montaje. Tareas más sencillas y con movimientos más limitados, como las de la pintura y paletización, suelen exigir 4 o 5 grados de libertad, debido a esto se seleccionan seis grados de libertad, con lo cual se pretende que el manipulador robótico pueda llegar a ser flexible, en un futuro dado.

En la tabla 3.1 se mencionan algunas características, de las configuraciones más importantes de los robots que existen. Posteriormente se realiza una matriz de decisión para seleccionar la configuración más pertinente. Aunque de un principio se propone un manipulador robótico de configuración antropomórfica.

Tabla 3.1 Configuraciones básicas

Figura	Configuración	Características
	Cartesiana	Se necesita una subestructura que soporte a los rieles, ocupa estructuras grandes y voluminosas, no puede operar en lugares muy reducidos. Es fácil su control.
	Cilíndrica	La zona de trabajo es reducida, normalmente se usa para carga y descarga de productos.
	Polar	Es más flexible que los anteriores, su control es un poco más complejo, su espacio de trabajo es mayor al de los anteriores.
	Antropomórfica	Tiene un amplio espacio de trabajo, su control es por consiguiente más complejo, puede trabajar en espacios muy cerrados, debido a que no es voluminoso y puede llegar a lugares donde los otros tres no llegan. Es utilizado para realizar trabajos finos. Como pintura en la industria automotriz.

Se realizara un matriz de decisión para ver en realidad que configuración es más flexible. Se asignaran valores de 1 como malo, 2 como regular y 3 bueno. Por lo que la configuración que tenga el puntaje más alto es el mejor.

Criterios de selección	Robot Cartesiano	Robot Cilíndrico	Robot Polar	Robot Antropomórfico
Acceso a puntos situados relativamente cerrados.	1	2	2	3
Amplio volumen de trabajo.	2	2	2	3
Fácil de construir	2	2	3	3
Se utiliza en tareas complejas.	1	1	2	3
Fácil de programar	3	2	2	1
<b>Resultados</b>	<b>9</b>	<b>9</b>	<b>11</b>	<b>13</b>

Matriz de decisión 3.1 Selección de configuración.

De la matriz anterior se puede observar que una configuración antropomórfica es más flexible, ocupa menor espacio, su manufactura no es complicada, su control es complejo pero los movimientos que puede realizar también los son. Se seleccionan seis grados de libertad debido a que para posicionar y orientar un cuerpo de cualquier manera en el espacio son necesarios seis parámetros, tres para definir la posición y tres para la orientación.

### 3.2 Elementos mecánicos del manipulador robótico.

El manipulador tiene un alcance de 700mm, esta distancia se repartirá en los tres eslabones que conforman al robot, más la longitud del efector final, en la figura 3.1 se pueden observar los componentes básicos que formaran la estructura.

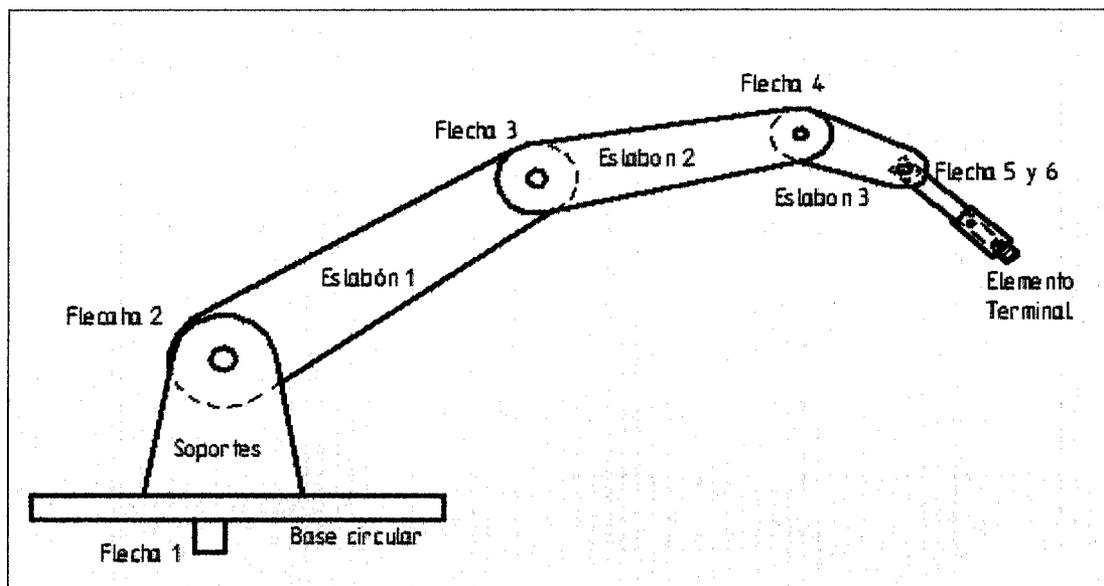


Figura 3.1 Esquema general del manipulador robótico.

El manipulador robótico consta de flechas de transmisión o simplemente flechas, con el fin de transferir movimiento y par de torsión rotatorios para cada eslabón, por lo que se diseñarán las flechas adecuadas para cada articulación. Las flechas soportaran engranes de sinfín mismos que transmitirán un movimiento rotatorio que producirá un actuador el cual tendrá acoplado un tornillo de sinfín. Las flechas, no tendrán modificaciones en el diámetro, en toda su longitud. Se maquinarán con tornos convencionales, y no con máquinas de control numérico debido a que son pocas piezas y de geometría sencilla.

Los eslabones son de una geometría rectangular, tendrán un radio a los costados, esto con el fin de darles estética y no sean completamente cuadrados, se maquinarán en una fresa convencional, debido a que su geometría no es compleja, se propone que el material sea aluminio, esto con el fin de que no sean piezas muy pesadas, pero si resistentes, ya que los eslabones serán los encargados de recibir parte de la carga que el robot podrá levantar, así como su propio peso.

La base que soportará a todo el sistema, la base circular, los Soportes y el efector final se detallan en el capítulo 5, todos estos elementos que componen al robot son de geometrías sencillas, que se maquinarán en tornos y fresas convencionales.

Se propuso que el material con el que se elaboran las piezas sea aluminio, acero y nylonid, realizaremos un análisis para ver si es conveniente usar aluminio y el acero, o es preferible algún otro material, para lo cual existe una metodología para la selección de materiales que se enuncia a continuación.

### **3.2.1 Selección de materiales**

Se deben de satisfacer tres criterios generales para la selección de materiales los cuales son:

El perfil de propiedades, en este hay que considerar las restricciones y los requerimientos con las propiedades. El perfil de proceso, en este se busca identificar el tratamiento que permita dar al material la forma deseada, para después unirlo y terminarlo al costo mínimo. Y por último el perfil de ambiente en el cual se busca que el material resista a de terminadas condiciones. Al mismo tiempo se debe de considerar el costo y el comportamiento a determinados factores.

#### **3.2.1.1 Rendimiento y eficiencia de los materiales**

Es muy frecuente que para seleccionar a un material no sólo se base en las propiedades específicas, sino en una combinación de propiedades, por reducir al mínimo el peso y costo. Hay que considerar también los factores que intervienen en la selección de un material, que es su índice de rendimiento o eficiencia.

Se puede definir al rendimiento de un material estructural como el cociente de la carga que un material puede soportar entre la masa o peso del material, para una geometría estructural definida, es decir:

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Carga sobre el elemento estructural}}{\text{Peso del material}} = \frac{P}{m} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

La carga  $P$  es lo máximo que el material puede soportar, con base en el criterio de falla del material, elegido. Esta carga se puede conocer por medio de las modalidades fundamentales que son: tensión axial, compresión, pandeo, flexión y torsión. Para seleccionar el material adecuado necesitamos definir que es lo que queremos realizar.

Se necesita construir un prototipo de un manipulador robótico, hay que mencionar que los eslabones, las flechas y demás aditamentos no deben de ser muy pesados pero si resistentes, debido a que entre mas pesados sean mayor será el tamaño de los motores y por consiguiente el consumo de energía de los motores aumenta, lo cual implica que se eleven los costos y el peso. Debido a esto es necesario establecer un criterio de selección de materiales resistentes y ligeros para la construcción del prototipo.

Considerando que el primer eslabón es el que soporta el mayor peso, en comparación de los dos restantes, se realizará el análisis para el diseño del primer eslabón, y con base en los resultados se aplicará a los dos eslabones restantes y demás partes del manipulador robótico.

El primer eslabón será considerado como una viga en voladizo, de sección rectangular, de ancho  $b$  y espesor  $t$ , el cual será sometido a una carga  $P$ , en su extremo libre como se puede observar en la figura 3.2. Esta carga produce un momento flexionante  $M$ . y el esfuerzo de flexión  $\sigma_x$ , el centro de masa  $c$  queda definido por:

$$\sigma_x = \frac{Mc}{Ix} \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Donde  $I_x$  es el momento de inercia o segundo momento de la sección transversal con respecto al eje centroidal perpendicular al plano del par  $M$ .

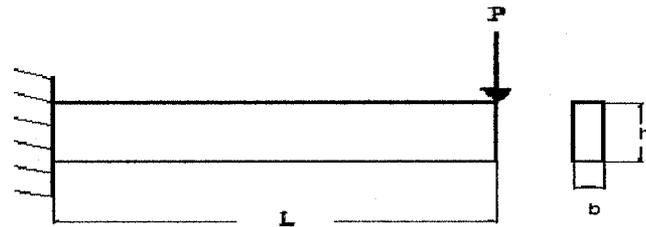


Figura 3.2 Carga sobre el primer eslabón

El momento de inercia esta dado por la siguiente expresión:

$$I_x = \frac{bh^3}{12} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Sustituyendo a  $I_x$  y  $c = \frac{h}{2}$  en la ecuación 3.2 se tiene lo siguiente:

$$\sigma_{dis} = \frac{6M}{bh^2} \quad \text{Ecuación 3.4}$$

Donde  $\sigma_{dis}$  es el esfuerzo de diseño. Reemplazando el esfuerzo de diseño de la ecuación 3.4 con el esfuerzo de fluencia  $\sigma_f$  del material dividido por el factor de seguridad  $S_f$  se tiene:

$$\sigma_f = \frac{6MS_f}{bh^2} \quad \text{Ecuación 3.5}$$

Es necesario encontrar  $P$  para utilizar la ecuación de la eficiencia, donde  $M = P.L$ , y sustituyendo a  $M$  en (3.5) y despejando a  $P$  se tiene:

$$P = \frac{\sigma_f bh^2}{6LS_f} \quad \text{Ecuación 3.6}$$

Ahora si la masa del material es  $m = Al.\rho$ , donde  $A$  es el área, de la sección transversal de la viga,  $l$  es la longitud, y  $\rho$  es la densidad del material. Con la carga máxima por unidad de masa, la eficiencia o rendimiento es por lo tanto:

$$\text{Eficiencia} = \frac{\sigma_f bh^2}{6S_f AL^2 \rho} = \frac{bh^2}{6S_f AL^2} \cdot \frac{\sigma_f}{\rho} \quad \text{Ecuación 3.7}$$

Puesto que  $S_f$ ,  $L$ ,  $A$ ,  $d$  y  $h$  son constantes de diseño, el criterio de selección de materiales de carga máxima eficiencia estructural es  $(\sigma_f / \rho)$  la cual es llamada también como la razón resistencia peso, debido a que se refiere a la condición de mínimo peso.

También se puede definir la economía de un material como:

$$\text{Economía} = \frac{\text{Carga que la estructura soporta}}{\text{Costo de la estructura}} = \frac{P}{C_m \cdot m} \quad \text{Ecuación 3.8}$$

Donde  $C_m$  es el costo del material por unidad de masa y  $m$  es la masa. Para obtener la máxima economía del material se deben de dividir los factores de la ecuación 3.7 entre  $C_m$ .

Para maximizar la economía de un material resistente y ligero el factor es:  $\sigma_f / C_m \cdot \rho$

Se utiliza el diagrama de Ashby, para realizar la etapa conceptual de la selección del material. Los diagramas de Ashby son gráficas que representan la combinación de las propiedades de los materiales. Por ejemplo, densidad en función de la resistencia para materiales ligeros y resistentes. Las gráficas están trazadas en escalas logarítmicas. El criterio de resistencia a la falla que se utiliza en el diagrama  $\sigma / \rho$ , es el esfuerzo de fluencia en el caso de los metales y polímeros

Los diagramas muestran las propiedades de cada una de las diferentes clases de los materiales, forman grupos los cuales se muestran dentro de zonas en los diagramas. Ahora se procede a trabajar con el índice de eficiencia obtenido de la ecuación 3.7, para utilizar el diagrama de Ashby. Donde  $C = \sigma_f / \rho$  de lo cual se obtiene:

$$\log \sigma_f = \log \rho + \log C \quad \text{Ecuación 3.9}$$

Esta expresión indica que una gráfica del logaritmo  $\sigma_f$  contra el logaritmo  $\rho$  puede mapear una familia de líneas rectas y paralelas con una pendiente de 1, cada línea representa diferentes índices de eficiencia. Todos los materiales que se encuentre sobre la línea funcionan igualmente bien, los que se encuentren por encima de la línea tendrán altos índices de funcionalidad. Con el fin de eliminar materiales inadecuados se pone la restricción que el esfuerzo en el eslabón del manipulador no rebase los 800[Mpa]. (Ver Ashby 1999).

Esto es representado en el diagrama de selección de materiales por una línea horizontal en 800[Mpa], con lo cual queda restringida la búsqueda y como posibilidades se tiene a los polímeros de ingeniería, aleaciones de aluminio, y algunos materiales compuestos.

### 3.2.1.2 Materiales a utilizar

Se seleccionan tres materiales para realizar la comparación de cual es el material que tiene las propiedades adecuadas para la fabricación de los mecanismos del manipulador robótico. La tabla 3.2 presenta el esfuerzo de fluencia  $\sigma_f$ , la densidad  $\rho$ , el costo del material  $C_m$  el índice de eficiencia y la máxima economía de tres materiales.

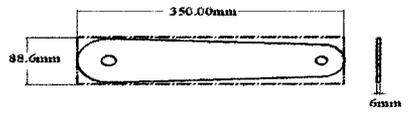
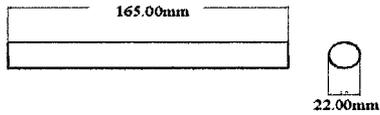
**Tabla 3.2** Eficiencia específica.

Material	$\sigma_f (Mpa)$	$\rho \left( \frac{g}{cm^3} \right)$	$C_m$	$\frac{\sigma_f}{\rho}$	$\frac{\sigma_f}{C_m \rho}$
Aluminio	275	2.71	\$ 70.00	101.48	1.44966
Acero 1040	210	7.85	\$ 28.00	26.81	0.960307
Nylamid	81.3	1.14	\$ 65.00	71.32	1.09312

Finalmente, la columna derecha de la tabla 3.2 muestra que el aluminio, es el material que tiene la máxima economía. Este factor provee una comparación en base al costo del material. El aluminio es el más económico, quedando en segundo lugar el nylamid y como tercer lugar el acero.

Tomando como base las especificaciones para la construcción del manipulador robótico, se desea seleccionar un material que sea ligero, fácil de maquinar y resistente, por lo que se obtendrá el peso del eslabón primario, y de la flecha del eslabón primario para corroborar los resultados obtenidos anteriormente. De dichos resultados se extrapolan para los demás aditamentos del manipulador robótico.

Tabla 3.2A. Masa de los elementos en estudio.

Descripción	Volumen [ cm <sup>3</sup> ]	Masa acero 1020 [gr]	Masa aluminio [gr]	Masa nylamid [gr]
Eslabón 1 	$V = a.b.c$ $V=186.060$	$m = V. \rho$ $m =1460.571$	$m = V. \rho$ $m=504.222$	$m = V. \rho$ $m = 212.108$
Flecha 1 	$V = \pi r^2 l$ $V=62.721$	$m = V. \rho$ $m =1407.112$	$m = V. \rho$ $m=170$	$m = V. \rho$ $m=204.203$

Con base a las características antes mencionadas se realiza una matriz de decisión para ver que material es el más conveniente, para la fabricación de las piezas que componen al manipulador robótico. Se toma a uno como malo, a dos como regular y a tres como bueno

Criterio de selección	Acero 1020	Aluminio	Nylamid
Peso.	1	2	3
Costo.	3	2	1
Fácil de maquinar.	1	3	1
Resistente.	3	2	1
<b>Resultados.</b>	8	9	6

Matriz de decisión 3.2 Selección de los materiales.

Se tiene al aluminio como el material apto para la fabricación de los elementos del manipulador robótico, por lo que hay que resaltar que es un material ligero y resiste además de que el manipulador robótico es de tipo didáctico. Por consiguiente los eslabones, las flechas y demás aditamentos que sean necesarios para obtener un modelo estable serán fabricados de aluminio.

El material que queda en segundo lugar es el acero, su desventaja es que muy pesado, por lo que sólo se usará en la tapa para base menor en forma de hexágono, en la base circular para soportes de eslabones y en los soportes, debido a que estos elementos no afectan a los actuadores que cargan con los eslabones y que son los que soportan las cargas.

De la figura 3.1 se puede obtener una lista de los elementos que componen al manipulador robótico principalmente, sin detallar a fondo los demás aditamentos necesarios para su buen funcionamiento. De donde se enuncia la siguiente tabla (ver tabla 3.3), en la cual podemos observar los elementos principales que componen al mecanismo, así como las dimensiones propuestas del material a utilizar para la fabricación del cuerpo básico del manipulador robótico.

**Tabla 3.2** Elementos principales propuestos para el manipulador robótico 6GLD

No. parte	Descripción	No. piezas	Dimensiones	Material
1	Base cilíndrica hexagonal	1	Por definir. Ver Cap. 5	Fundición hierro gris
2	Tapa para base menor en forma de hexágono.	1	Por definir. Ver Cap. 5	Acero 1020
3	Base circular para Soportes de eslabones	1	Diámetro de 250mm, altura de 150mm	Acero 1020
4	Soportes de eslabones	2	Altura 100mm, espesor de 6mm	Placa de aluminio
5	Flecha para junta 2	1	Por definir	Aluminio diámetro por definir
6	Eslabones primarios	2	Largo de 280mm, espesor de 6mm	Solera de ¼ * 12" * 3"
7	Flecha para junta 3	1	Por definir	Aluminio diámetro por definir
8	Eslabones secundarios	2	Largo de 220mm, espesor de 6mm	Solera de ¼ * 12" * 2"
9	Flecha para junta 4	1	Por definir Ver Cap. 5	Aluminio diámetro por definir
10	Eslabones terciarios	2	Largo 120mm, espesor de 6mm	Solera de ¼ * 6" * 1 ½"
11	Flecha para junta 5	1	Por definir Ver Cap. 5	Aluminio diámetro por definir
12	Flecha para junta 6	1	Por definir Ver Cap. 5	Aluminio diámetro por definir
13	Elemento terminal	1	Por definir Ver Cap. 5	Aluminio

La base que se propone hexagonal será de fundición de hierro gris, debido a que este material tiene la propiedad de absorber las vibraciones, con lo cual le dará estabilidad o todo el manipulador en caso de que se introdujera a una fábrica donde se produzcan vibraciones por algunas máquinas, o disminuirá las mismas vibraciones que el manipulador robótico pueda producir.

### 3.2.2 Tipos de transmisiones.

Las transmisiones en el manipulador robótico son los elementos encargados de transmitir el movimiento desde los actuadores hasta las articulaciones, principalmente se caracterizan por el par y la velocidad que proporcionan a la salida.

Entre los elementos más empleados para transmitir potencia destacan los que se mencionan en la tabla 3.4, de los cuales se realizara un análisis para seleccionar el tipo de transmisión que más convenga, tomando en cuenta que se desea diseñar un manipulador robótico en prototipo, tendrá una capacidad de carga de 3 [Kg]. En sus primeras tres articulaciones.

Como se observa de la tabla 3.4 el mejor elemento para utilizar en el manipulador robótico, es el sistema que se conforma por un engrane de sinfín, ya que es el único que tiene la propiedad de transmitir pares muy elevados, además de tener la propiedad de auto bloquearse, por lo que será el elemento a utilizar, además de ocupar poco espacio.

No se realizara una matriz de decisión debido a que ninguno de los elementos que se muestran en la tabla 3.4, tienen la propiedad de auto bloquearse, por lo que el engrane de sinfín será el mas conveniente para no perder la posición de las articulaciones del manipulador robótico en cualquier instante.

Se pretende poder fabricar todos los elementos que sean posibles y que estén al alcance de uno, tanto en lo económico, como en lo posible, por lo que se diseñaran los engranes de sinfín que se requieren, para que suministren el torque y la velocidad adecuada, para posteriormente manufacturarlos.

Tabla 3.4 Elementos que permiten construir transmisiones.

Denominación	Ventajas	Desventajas	Comentarios
Cable	Económico, fácil de utilizar, de adquirir.	No tiene precisión, se deforma muy fácilmente, no soporta cargas grandes.	No es recomendable para trabajos donde se requiera tener precisión.
Cadena	Se usa en distancias grandes, trabaja a velocidades moderadas.	No puede transmitir pares muy altos. No le da estabilidad a los mecanismos, no es apta para trabajos de precisión.	Es recomendable en distancias grandes, trabaja a velocidades bajas, es un poco ruidosa. Hay holgura.
Correa dentada	Se usa también en distancias grandes. Puede, trabajar a velocidades altas.	No es apta para transmitir pares muy altos.	Necesita estar bien tensada para que no puedan ocurrir errores.
Engrane helicoidal paralelo	Poca vibración y ruido, puede transmitir elevados niveles de potencia.	No tiene la propiedad de auto bloquearse.	En los engranes a pesar de que pueden transmitir pares elevados no se auto bloquean.
Engrane helicoidal cruzado	Sirven para transmitir movimiento, son silenciosos, tienen poca vibración.	No son aptos para transmitir pares de torsión o potencia elevados.	Solo sirven para transmitir movimiento, no son aptos para trabajos pesados.
Engrane cónico recto	Pueden trabajar hasta una velocidad de (10m/sec).	No pueden transmitir pares elevados,	Tienen mayor aplicación para transmitir velocidad
Engrane cónico en espiral	Ocupan menor diámetro que los cónicos rectos.	Trabajan a velocidades menores que los engranes cónicos rectos, no pueden transmitir pares elevados.	Tienen mayor aplicación para transmitir velocidad
Engrane de sinfín	Se crean razones muy grandes de pares debido a su configuración, tiene la propiedad de auto bloquearse.	Es más compleja su manufactura.	Puede transmitir pares desde 3:1 hasta 100:1, y tiene la propiedad de auto bloquearse.
Cremallera	Holgura media, es adecuado para desplazamientos lineales.	Rozamiento, ocupa un espacio muy amplio. No es muy fácil de maquinar	No puede transmitir pares elevados.

### **3.2.3.1 Procesos para la fabricación de engranes de sinfín**

Se requiere fabricar un engrane de sinfín que tenga buena precisión, que sea de alta calidad, que tenga un buen terminado, y que sea de bajo costo tanto el engrane de sinfín, como del proceso a utilizar para la manufactura.

Normalmente se dividen en dos clases los procesos para la fabricación de engranes los cuales son: maquinado y conformación. El maquinado a su vez se divide en desbaste y terminado. El conformado se refiere a fundición directa, moldeo, estirado o extrusión de formas de dientes en materiales fundidos, en polvo o ablandados por calor. El desvastado y terminado son técnicas de eliminación de materiales, en el corte o rectificado a partir de una pieza sólida a temperatura ambiente.

### **3.2.3.2 Conformación de dientes de engrane**

En todas las operaciones de conformación de dientes, los dientes del engrane se forman todos a la vez a partir de un molde o dado, en el cual se han maquinado la forma de los dientes. La precisión de los dientes depende de la calidad o molde, y es inferior a la que se logra por el maquinado. La mayor parte de estos métodos tienen costos de herramental elevados, lo que los hace adecuados para producciones grandes.

Se puede establecer que por los procesos de conformado no se obtiene una calidad adecuada, por lo que ninguno de estos procesos es útil para la fabricación de los engranes de sinfín que se requieren para el manipulador robótico.

### **3.2.3.3 Maquinado.**

La mayor parte de los engranes para transmisión se fabrican mediante un proceso de maquinado, a partir de piezas en bruto fundidas, forjadas o roladas en caliente. Los procesos de desvastado incluyen la fresadora, para darle la forma al diente mediante cortadores de conformado, la generación de la forma con un cortador de cremallera, un cortador conformador o una cabeza fresadora. Los procesos de acabado incluyen cepillado, bruñido, pulido, rectificado o esmerilado.

Se utilizará el proceso de desvastado para la fabricación de los engranes de sinfín, debido a que el cortador resulta económico, además considerando que no se cuenta con un presupuesto alto y que no son pocas las piezas que se fabricaran, se utilizará el proceso antes mencionado, para la fabricación de los engranes de sinfín.

En el proceso de desvastado, requiere un cortador de fresa conformado. El cortador debe de estar fabricado con la forma del espacio del diente del engrane para la geometría del diente, y para el número de dientes de cada engrane en particular.

El cortador giratorio se introduce en la pieza en bruto, cortando un diente a la vez. El engrane en bruto es girado un paso circular, y se hace el corte del siguiente diente. Se necesita un cortador de forma distinta para cada tamaño de engranes que se fabrique. A fin de reducir costos, a menudo el mismo cortador sirve para engranes de tamaños múltiples, resultando errores de perfil para todos, excepto para un número dado de dientes.

Cuando se requiere una precisión elevada, se llevan a cabo operaciones secundarias, para engranes fabricados.

Las operaciones de acabado típicamente eliminan muy poco o ningún material, pero mejoran la precisión dimensional, del acabado superficial y/o la dureza. Al someter al engrane de sinfín a un proceso de terminado, aumenta los costos, por lo que el engrane de sinfín a fabricar no se someterá a un proceso de terminado. Observando así en el manipulador robótico cuales pueden ser los errores que se producen al fabricar los engranes de sinfín.

### 3.3 Cojinetes

Debido a que en las juntas del manipulador robótico hay movimiento relativo entre la unión de los elementos, se utilizarán rodamientos o cojinetes, esto con el fin de obtener una baja fricción en las uniones deslizantes o en rotación, hay varios tipos de cojinetes, la ventaja de los cojinetes es que se seleccionan de catálogos, pues los hay en el mercado comercial. Por lo general en cualquier cojinete debe de haber lubricación a fin de reducir la fricción y disminuir el calor.

Hay varios tipos de cojinetes pero generalmente se agrupan en dos categorías generales, las cuales son cojinetes de bolas y de rodillos, ambos con muchas variantes dentro de esta división, se definirá brevemente las características de los diferentes tipos de cojinetes que existen para así seleccionar el más adecuado para implementarlo en el manipulador robótico.

Los **cojinetes de bolas**. Tienen cierta cantidad de esferas de acero endurecido y rectificando entre dos pistas, una interior y otra exterior en cojinetes radiales, y una pista superior y una inferior en cojinetes de empuje. Estos soportan cargas radiales y de empuje o combinadas en un grado variado.

El cojinete de bolas de contacto angular es diseñado para manejar cargas de empuje en una dirección, así como cargas radiales. Para tamaños menores y cargas ligeras los cojinetes de bolas son los menos costosos.

**Cojinetes de rodillos**. Estos tienen rodillos, rectos, cónicos o contorneados entre pistas. En general, los cojinetes de rodillos pueden soportar cargas estáticas y dinámicas (impacto), superiores a los cojinetes de bolas, en razón a su línea de contacto, y son menos costosos para tamaños y cargas mayores. A menos de que los rodillos sean cónicos o con contorno, sólo soportan carga en una dirección, ya sea radial o de empuje, según el diseño del cojinete.

El cojinete de agujas, utiliza rodillos de pequeño diámetro. Sus ventajas son una mayor capacidad de carga en razón de un complemento total de rodillos y a una dimensión radial compacta. En este caso la flecha sobre la cual giran los rodillos deberá de endurecerse y rectificarse.

Un cojinete de rodillos, cónicos están diseñado para soportar elevadas cargas de empuje y radiales. Los cojinetes de rodillos esféricos, autoalineables no permiten ningún momento en el cojinete.

Se realizara una matriz de decisión para ver cual es le cojinete mas adecuado, para lo cual se tomara el valor de uno como malo, un dos como regular, y un tres como bueno.

Criterios de selección	Cojinete bolas	Rodillos rectos	Rodillos conicos
Soporta cargas radiales	2	2	2
Soporta cargas de empuje.	2	2	2
Soporta cargas radiales y de empuje	2	2	1
Bajo costo	3	2	1
Soporta carga estática	2	3	2
Soporta cargas dinámicas.	2	3	2
Compacto	1	2	2
<b>Resultados</b>	14	16	12

**Matriz de decisión 3.3** Selección de cojinetes.

Se utilizarán cojinetes de agujas, ya que al ser compactos, tiene un menor peso y ocupan menor volumen, que los demás cojinetes, además de soportar mayor carga estática y dinámica.

Su precio no es mayor al 20% en comparación con el de bolas, por lo cual es admisible para implementarlo en el manipulador robótico. Además como no se producen aceleraciones altas, no es necesario endurecer y rectificar las flechas.

### 3.4 Parte electrónica

La parte electrónica es muy importante, ya que permitirá poder manipular al manipulador robótico, esta conformada por los actuadores, los circuitos integrados, los sensores, entre los más importantes.

#### 3.4.1 Actuadores

Su misión principal es generar el movimiento, de los dispositivos a utilizar, según las ordenes dadas por la unidad de control. Se clasifican en tres grandes grupos, según la energía que lleguen a utilizar:

- Neumáticos
- Hidráulicos
- Eléctricos

Los motores eléctricos son los más utilizados, por su fácil y preciso control, así como por otras propiedades ventajosas que establece su funcionamiento, como consecuencia del empleo de la energía eléctrica.

Se descarta la posibilidad de utilizar actuadores neumáticos e hidráulicos, debido a que son de mayor tamaño, por consiguiente pesados en comparación con los actuadores eléctricos, además que su costo es muy elevado, no son muy precisos, su control es más complejo y requieren un mantenimiento constante.

### 3.4.2 Actuadores eléctricos.

Las características de control, sencillez y precisión de los accionamientos eléctricos han hecho que sean los más usados en los diferentes dispositivos industriales actuales, así como en la robótica.

Existen varios tipos de motores, de entre los cuales se pueden clasificar en dos grandes grupos, que a su vez se subdividen en otros como se enuncia a continuación.

1. Motores de corriente directa que a su vez se dividen en:
  - I. Servomotor.
  - II. Motor a pasos.
  - III. Motorreductores
  
2. Motores de corriente alterna (AC), que a su vez se dividen en:
  - a. Motores asíncronos.
  - b. Motores síncronos.

#### 3.4.2.1 Selección de los motores.

En el caso de los **motores de corriente alterna**, no son muy utilizados en aplicaciones de robótica, debido a que su control es más complicado y más costoso, por lo que para este trabajo de tesis se utilizan los motores de corriente directa.

En los **motores de corriente directa** existen motores con escobillas, o sin escobillas, están los motores a pasos, los servomotores y los motorreductores.

No se utilizarán **motores a pasos** debido a que entre los inconvenientes se puede citar que su funcionamiento a bajas velocidades no es suave, y que existe el peligro de pérdida de una posición por trabajar en bucle abierto. Tienden a sobrecalentarse trabajando a velocidades elevadas y presentan un límite en el tamaño que pueden alcanzar.

Su potencia nominal es baja y su precisión (mínimo ángulo girado) llega típicamente hasta  $1.8^\circ$ . Se emplean para el posicionado de ejes que no precisan grandes potencias (giro de pinza) o para robots pequeños (educacionales). Por tener una potencia nominal baja no son adecuados para implementarlos en el manipulador robótico.

Por otro lado los **servomotores** son un tipo especial de motor de c.c. que se caracterizan por su capacidad para posicionarse de forma inmediata en cualquier posición dentro de su intervalo de operación.

El campo magnético de un motor de c.c se puede producir por bobinas o imanes permanentes. Debido a la popularidad de los motores de CD de imán permanente en aplicaciones de sistemas de control, se escoge este tipo de motores.

Para el caso de los **motorreductores** son una variante de los motores de CD, ya que la única diferencia es que cuentan con un juego de engranes acoplado en la flecha de salida del motor, o de un engrane de sinfín, produciendo así una disminución considerable de la velocidad, y el aumento del par del motor, los motorreductores pueden ser con escobillas o sin escobillas. Y la potencia de estos depende del embobinado que tengan.

Los motorreductores de engrane de sinfín por estar compuestos con estos elementos cuentan con la propiedad de auto bloquearse, es decir aun dejándoles de aplicar pulsos eléctricos, la flecha de salida no pierde su lugar, aun cuando le aplique una fuerza externa y por la geometría que presenta este mecanismo, es muy difícil que se logre mover, por lo que se considera que son los motores mas recomendables para la implementación del manipulador robótico, además que los hay en diversas capacidades. A diferencia con los servos este tipo de motor no se daña tan fácilmente cuando se les aplica cargas elevadas y pueden girar indefinidamente.

Los motores de c.c de imán permanente se pueden clasificar de acuerdo con el esquema de conmutación y al diseño de la armadura. Los motores de CD convencionales tienen escobillas mecánicas y conmutadores este tipo de motor es el que se utilizarán para este trabajo de tesis debido a que son los más comerciales. Sin embargo no son los más eficientes debido a que una clase importante de motores de CD la conmutación se hace en forma electrónica; este tipo de motor se llama motor de CD sin escobillas.

En el motorreductor con escobillas e imán permanente la conmutación se hace mecánicamente a través del contacto entre el inducido y las escobillas. Hay que mencionar que este sistema es muy poco eficiente y el rozamiento y la resistencia eléctrica provocan que haya una pérdida de energía que se transforma en calor, hay que realizar mantenimientos periódicos, cambiar las escobillas, muelles, dependiendo del desgaste del conmutador.

### 3.5 Etapas de potencia.

Los dispositivos semiconductores de potencia son los elementos más importantes de un sistema electrónico de potencia. El transistor posee de tres partes colector emisor y base, es un dispositivo electrónico semiconductor se utilizará para este trabajo de tesis como conmutador on-off, teniendo así que la corriente que circula por el "colector" es función amplificada de la que se inyecta en la "base", pero naturalmente, el transistor sólo gradúa la corriente que circula a su través, desde una fuente de corriente continua conectada al "emisor" y circula hacia la carga por el "colector", según el tipo de circuito que se utilice.

El factor de amplificación logrado entre corriente de base y corriente de colector, se denomina ganancia del transistor, otros parámetros a tener en cuenta y que son particulares de cada tipo de transistor son: Tensiones de ruptura de Colector Emisor, de Base Emisor, de Colector Base, Potencia Máxima, disipación de calor, frecuencia de trabajo, y varias tablas donde se grafican los distintos parámetros como son, corriente de base, tensión Colector Emisor, tensión Base Emisor, corriente de Emisor, etc.

Los tres tipos de esquemas básicos para utilización analógica de los transistores son: emisor común, colector común y base común. Cuando se selecciona un transistor hay que tomar en cuenta el tipo de encapsulado, así como el esquema de identificación de los terminales. También hay que conocer una serie de valores máximos de tensiones, corrientes y potencias que no se deben de sobrepasar para no destruir el dispositivo.

El parámetro de la potencia disipada por el transistor es especialmente crítico con la temperatura, de modo que esta potencia disminuye a medida que crece el valor de la temperatura, siendo a veces necesario la instalación de un ventilador o un disipador de calor.

La zona de funcionamiento del transistor que se utilizará es la de saturación debido a que en esta zona el transistor es utilizado para aplicaciones de conmutación (potencia, circuitos digitales), y lo podemos considerar como un cortocircuito entre el colector y el emisor.

Para lograr el control de los motorreductores se utilizarán a los transistores en configuración denominada puente H, la cual es una configuración que permite controlar el sentido de giro del motor, pero no la velocidad por lo que se diseñara una etapa de potencia en configuración en puente H, la cual contara con tres pines principalmente que serán el pin de activación de la etapa, el pin de invertir giro, y el pin de señal de PWM. La cual se explica en el capítulo 5.

La **Modulación por Ancho de Pulso (PWM)** para el motorreductor de c.c está basada en el hecho de que si se recorta la señal c.c de alimentación en forma de una onda cuadrada, la energía que recibe el motor disminuirá de manera proporcional a la relación entre la parte alta (habilita corriente) y baja (cero corriente) del ciclo de la onda cuadrada. Controlando esta relación se logra variar la velocidad del motorreductor de una manera bastante aceptable.

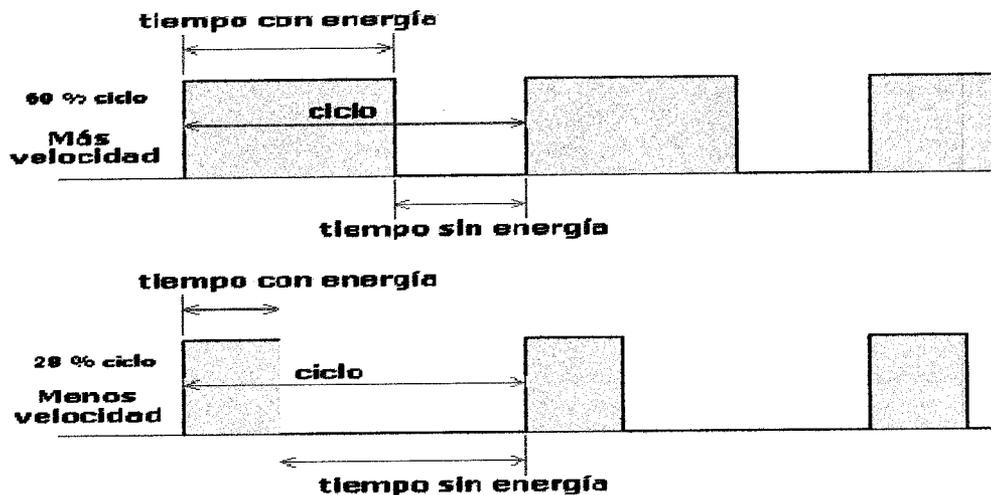


Figura 3.6 Señal de PWM para el motorreductor.

### 3.6 Sensores

Para medir el desplazamiento angular de las juntas rotacionales se tiene que utilizar sensores para poder determinar la posición de estas en cada instante existen los sensores denominados como encoders, que son los mas indicados para este trabajo pero debido a sus altos costos se utilizan potenciómetros lineales.

### 3.6.1 Potenciómetro de Precisión (lineales)

Básicamente, los potenciómetros consisten en una resistencia provista de un contacto móvil. El movimiento del contacto puede ser de traslación, rotación, o una combinación de los dos. El elemento resistente se excita con voltaje de c.c o de c.a, y el voltaje de salida es (idealmente) función lineal del movimiento de entrada.

Existen dos restricciones en todos los sensores resistivos.

La primera restricción es que cada uno de ellos necesita una alimentación eléctrica para dar una señal de salida, puesto que un cambio en la resistencia no es una señal en sí.

La segunda restricción es que, esa alimentación, cuya magnitud afecta a la señal de salida, es limitada por el mismo calentamiento del sensor, ya que un cambio en temperatura también cambia el valor de resistencia.

### 3.6.2 Sensor de límite de carrera o bumper.

Este sensor indica el inicio y fin de carrera de los motores o punto de partida del efector final.



Figura 3.7 Sensor de límite de carrera

Descripción: El bumper es un conmutador de 2 posiciones con muelle de retorno a la posición de reposo y con una palanca de accionamiento más o menos larga según el modelo elegido. Funcionamiento: En estado de reposo la patita común (C) y la de reposo (R) están en contacto permanente hasta que la presión aplicada a la palanca del bumper hace saltar la pequeña pletina acerada interior y entonces el contacto pasa de la posición de reposo a la de activo (A), se puede escuchar cuando el bumper cambia de estado, porque se oye un pequeño clic, esto sucede casi al final del recorrido de la palanca.

### 3.7 Selección del microcontrolador.

Se denomina microcontrolador a un dispositivo programable capaz de realizar diferentes actividades que requieran del procesamiento de datos digitales, del control y comunicación digital de diferentes dispositivos

Los microcontroladores poseen una memoria interna que almacena dos tipos de datos; las instrucciones, que corresponden al programa que se ejecuta, y los registros, es decir, los datos que el usuario maneja, así como registros especiales para el control de las diferentes funciones del microcontrolador.

Los microcontroladores se programan en lenguaje ensamblador principalmente y cada microcontrolador varía su conjunto de instrucciones de acuerdo a su fabricante y modelo. De acuerdo al número de instrucciones que el microcontrolador maneja se le denomina de arquitectura RISC (reducido) o CISC (complejo).

Los microcontroladores poseen principalmente una ALU (Unidad Lógico Aritmética), memoria del programa, memoria de registros, y pines I/O (entrada I/O salida). La ALU es la encargada de procesar los datos dependiendo de las instrucciones que se ejecuten (ADD, OR, AND), mientras que los pines son los que se encargan de comunicar al microcontrolador con el medio externo; la función de los pines puede ser de transmisión o recepción de datos, alimentación de la corriente para el funcionamiento de este o pines de control específico.

En este proyecto se utiliza el PIC 16F877. Este microcontrolador es fabricado por MicroChip familia a la cual se le denomina PIC. El modelo 16F877 posee varias características que hacen a este microcontrolador un dispositivo muy versátil, eficiente, económico y práctico para ser empleado en la aplicación que posteriormente será detallada.

Características más importantes del PIC:

- Soporta modo de comunicación serial, posee dos pines para ello.
- Se puede ampliar la memoria para datos y programa.
- Memoria reprogramable: La memoria en este PIC es la que se denomina FLASH; este tipo de memoria se puede borrar electrónicamente (esto corresponde a la "F" en el modelo).

- Set de instrucciones reducido (tipo RISC), pero con las instrucciones necesarias para facilitar su manejo.
- Tiene dos salidas de señal de PWM
- Cuenta con ocho pines para señales analógicas-digitales

### Aplicación

Se utilizará el microcontrolador denominado PIC 16F877, para diseñar un controlador que permita establecer una comunicación entre una PC, el microcontrolador y las etapas de potencia.

Es decir por medio de una PC, se mandaran datos a los microcontroladores, los cuales recibirán la información por medio de la comunicación serial conocida como RS-232. Los microcontrolador tendrá conectado a sus pines las siete etapas de potencia que accionan a los siete motores que componen al manipulador robótico, como también tendrá conectados a los potenciómetros lineales, que son los encargados de leer cada una de las posiciones angulares de las seis juntas rotacionales que componen al manipulador robótico, por medio del convertidor analógico digital que el PIC posee internamente.

Así el usuario le dará una instrucción por medio de la PC, para que el manipulador robótico realice una tarea, con lo cual el microcontrolador recibirá la orden, la interpretara accionará las etapas de potencias adecuadas, y comenzara a censar por medio de los potenciómetro lineales, el movimiento angular que las juntas rotacionales, cuando los valores de los potenciómetros lleguen a la posición deseada, el microcontrolador mandara las señales correspondientes a las etapas de potencia para que estas dejen de trabajar, cumpliendo con la tarea requerida.

## Capítulo 4.

# Modelación cinemática.

### Introducción

En este capítulo se presenta el modelado cinemático del manipulador robótico de 6GDL. Este se basa en el empleo de transformaciones entre sistemas de referencia, se estudia el modelado directo e inverso que permiten tener la posición y orientación del efector final en función de las variables articulares.

#### 4.1 Caracterización del manipulador robótico de 6GDL

El manipulador robótico a analizar es una cadena cinemática abierta formada por cuatro cuerpos rígidos, más el elemento terminal, todos estos elementos están acoplados por juntas rotacionales, su campo de acción es en el plano XYZ. El problema consiste en construir las ecuaciones que gobiernan la cinemática de la cadena que se muestra en la figura 4.1. Obteniendo que el extremo final del tercer eslabón siga estrictamente una trayectoria específica descrita en el plano XYZ. Así como también de colocar una herramienta rotatoria en lugar del efector final con el fin de realizar una operación de taladrado simulando un proceso industrial. En la figura 4.1 podemos observar como es que se encuentra el sistema del manipulador robótico de seis grados de libertad.

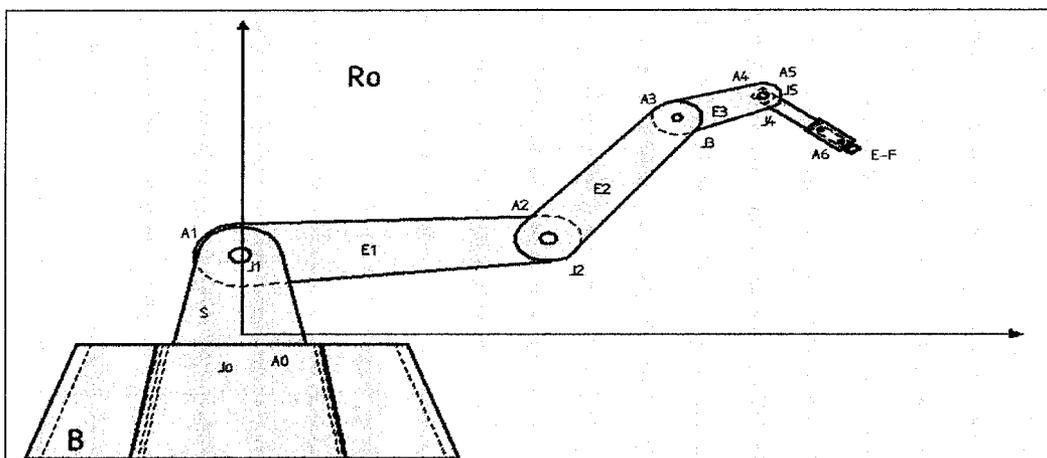


Figura 4.1 Caracterización del manipulador robótico Ro.

El manipulador robótico está montado sobre una base (B) a la cual se le denomina tierra del sistema. Sobre la base se encuentran los soportes (S) que serán los encargados de cargar a los eslabones E1, y estarán unidos por medio de la junta J1, que estos a su vez serán los encargados de soportar a los eslabones E2, que estarán unidos por medio de junta J2, y así sucesivamente hasta llegar al efector final que estará soportado por el eslabón E3 y la junta rotacional J4.

En la base (B) se montara un actuador el cual es denominado A0, el cual se encarga de hacer girar al sistema completo en el plano XY. En la junta rotacional J1 se encuentra el actuador A1 que será el encargado de mover al eslabón E1, en la junta rotacional J2 se encuentra el actuador A2, el cual moverá al eslabón E2, en la junta J3 se encuentra el actuador A3 que será el encargado de mover el eslabón E3, en la junta J4 se encuentra el actuador J4 que será en encargado de mover al efector final, en la junta J4 a la mitad de su longitud, sale la junta J5 que tendrá acoplado el actuador A5, el cual hará girar al elemento terminal, y por ultimo tenemos el actuador A6, que será el encargado de abrir y cerrar la pinza del efector final.

#### 4.2 Representación de la posición y orientación del manipulador robótico de 6GDL

En robótica es necesario poder describir de forma conveniente las posiciones y orientaciones de los objetos en el espacio. Por lo que es imprescindible conocer la posición y orientación en el plano y en el espacio del manipulador robótico de 6GDL esto se logrará introduciendo las operaciones elementales de rotación y traslación y considerando los cambios de sistemas de referencia. En la figura 4.2 podemos observar los sistemas de referencia asociados a cada articulación en el plano

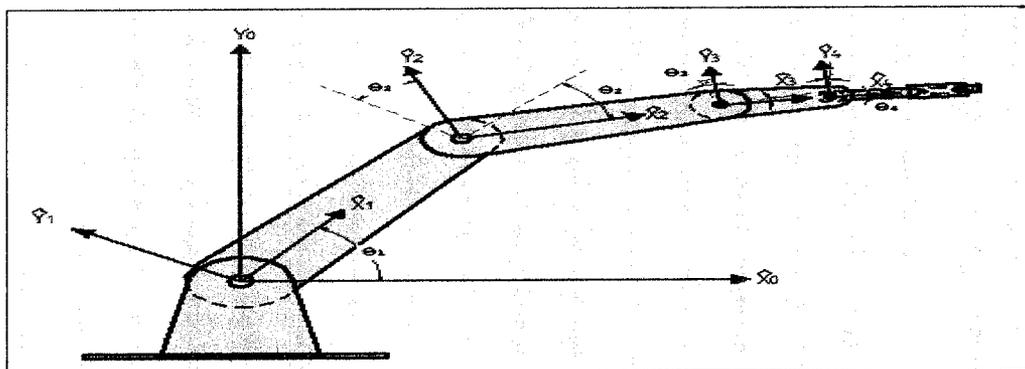


Figura 4.2 manipulador robótico plano con seis articulaciones de rotación y una prismática.

Ahora considerando al manipulador robótico de seis grados de libertad con seis articulaciones, que se mueven en el plano como se muestra en la figura 4.2. Para este caso se asocia un cuadro de referencia a cada articulación, teniendo así las matrices de rotación en el plano "Z", "X", correspondientes de cada sistema. En la figura 4.3 se muestran los sistemas de referencia en el espacio, del manipulador robótico de 6GDL

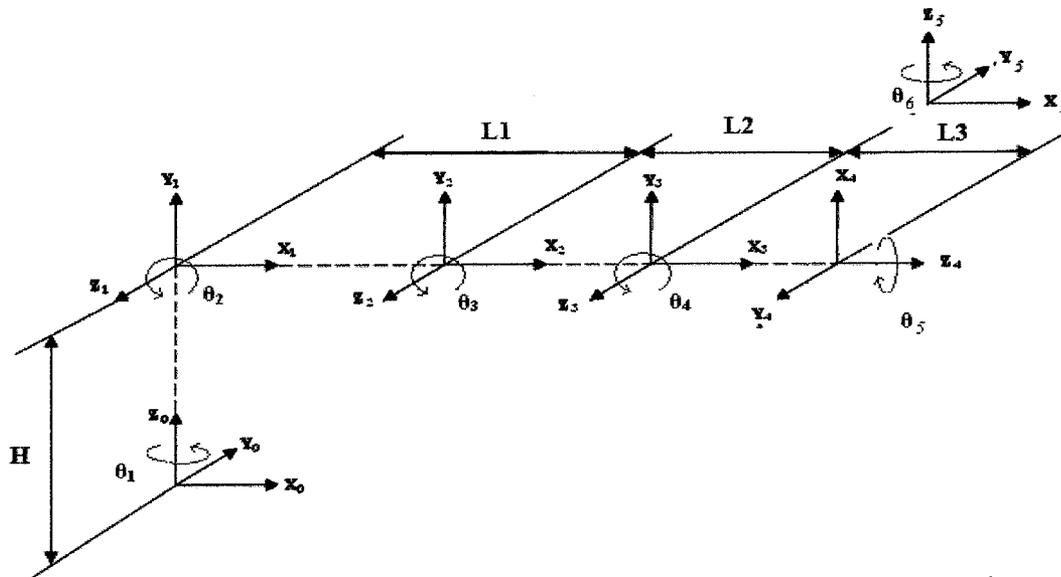


Figura 4.3 manipulador robótico plano con seis articulaciones de rotación

### 4.3 Modelación cinemática directa del manipulador robotico.

Se utilizará el Método general para resolver el problema de la cinemática directa, el cual trata de emplear matrices de transformación que relacionan sistemas de referencia. El robot articulado puede describirse definiendo cuatro magnitudes asociadas a cada articulación, la articulación es una variable y las tres restantes son parámetros fijos, utilizando la representación de **Denavit-Hartenberg** (D-H), se define lo siguiente:

$Z_i$ . Es el eje del par que conecta los eslabones  $i$  e  $i+1$ , se elige como:

1. El eje de rotación, si el par asociado es rotacional (R).
2. La dirección de traslación si por el asociado es prismático (P).

$X_i$ . Es la perpendicular común a  $Z_{i-1}$  y  $Z_i$  dirigido de  $Z_{i-1}$  a  $Z_i$

$Y_i$ . Completa el sistema dextrógiro.

La representación de D-H de un elemento rígido depende de cuatro parámetros geométricos asociados con cada elemento. Estos cuatro parámetros describen completamente cualquier articulación prismática o de revolución. Se definen como sigue:

$\theta_i$  Es el ángulo de la articulación del eje  $X_{i-1}$  al eje  $X_i$  respecto del eje  $Z_{i-1}$ , (Utilizando la regla de la mano derecha).

$d_i$ . Es la distancia desde el origen del sistema de coordenadas  $(i-1)$ -ésimo hasta la intersección del eje  $Z_{i-1}$  con el eje  $X_i$  a lo largo del eje  $Z_{i-1}$ .

$a_i$ . Es la distancia de separación desde la intersección del eje  $Z_{i-1}$  con el eje  $X_i$  hasta el origen del sistema  $n$ -ésimo a lo largo del eje  $X_i$ , (o la distancia mas corta entre los ejes  $Z_{i-1}$ , y  $Z_i$ ).

$\alpha_i$ . Es el ángulo de separación del eje  $Z_{i-1}$  al eje  $Z_i$  respecto del eje  $X_i$ , (utilizando la regla de la mano derecha).

Es necesario mencionar que el manipulador robótico realiza movimientos de rotación en los ejes "X" y "Z" por lo que se tendrán que considerar las matrices de rotación correspondientes a dichos planos. La matriz de rotación en el plano "X" es:

$$R_x(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Y la matriz de rotación el plano "Z" es:

$$R_z(\theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{Ecuación 4.2}$$

Por lo que la matriz de rotación compuesta en el plano "Z" y el plano "X" queda de la siguiente forma:  $R_z(\theta). R_x(\alpha) = Q [i, i+1]_i$

$$R_z(\theta). R_x(\alpha) = Q [i, i+1]_i = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\cos(\alpha)\sin(\theta) & \sin(\alpha)\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\alpha)\cos(\theta) & -\cos(\theta)\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix} \quad \text{Ecuación 4.3}$$

El vector de traslación "a" se definirá como:

$$a[i, i+1]_i = \begin{pmatrix} a_i \cos(\theta_i) \\ a_i \sin(\theta_i) \\ d_i \end{pmatrix} \quad \text{Ecuación 4.4}$$

De la matriz 4.3 y 4.4 se puede obtener la matriz de transformación homogénea de 4X4, la cual se describe a continuación.

La **matriz de transformación homogénea** es una matriz 4 x 4 que transforma un vector de posición expresado en coordenadas homogéneas desde un sistema de coordenadas hasta otro sistema de coordenadas. En la ecuación 4.5 se presenta una matriz de transformación homogénea se puede considerar que consiste en cuatro submatrices:

$$T = \begin{bmatrix} R_{3x3} & P_{3x1} \\ f_{1x3} & 1x1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{matriz de} & \text{vector de} \\ \text{rotacion} & \text{posicion} \\ - & - \\ \text{transformacion} & \text{escalado} \\ \text{de perspectiva} & \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 4.5}$$

La submatriz 3 x 3 superior izquierda representa la matriz de rotación; la submatriz superior derecha 3 x 1 representa el vector de posición del origen del sistema de coordenada rotado con respecto al sistema de referencia; la submatriz inferior izquierda 1 x 3

Por lo que finalmente se obtiene la matriz de transformación homogénea compuesta  $Rz(\theta). Rx(\alpha) = :$

$$T = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\cos(\infty)\sin(\theta) & \sin(\infty)\sin(\theta) & a\cos(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\infty)\cos(\theta) & -\sin(\infty)\cos(\theta) & a\sin(\theta) \\ 0 & \sin(\infty) & \cos(\infty) & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{Ecuación 4.6}$$

### 4.3.1 Método de Denavit-Hartenberg

Una vez establecido el sistema de coordenadas D-H para cada elemento, se puede desarrollar fácilmente una matriz de transformación homogénea que relacione el sistema de coordenadas  $i$ -ésimo con el sistema de coordenadas  $(i-1)$

De la figura 4.3 se obtienen los parámetros de la matriz de D-H. Los parámetros quedan de la siguiente manera representados en la tabla 4.1

**Tabla 4.1** Parámetros del manipulador robótico.

$i$	$a_i$ [mm]	$\alpha_i$ [°]	$d_i$	$\theta_i$ [°]
1	0	90	H	$\theta_1 + 180^\circ$
2	L1	0	0	$\theta_2 + 180^\circ$
3	L2+L3	0	0	$\theta_3$
4	0	0	0	$\theta_4$
5	0	-90	0	$\theta_5$
6	0	90	0	$\theta_6$

De la tabla 4.1 tomamos los valores para sustituirlos en las matrices 4.6 quedando de la siguiente forma:

$$A_{01} = \begin{pmatrix} -\cos(\theta_1) & 0 & -\sin(\theta_1) & 0 \\ -\sin(\theta_1) & 0 & \cos(\theta_1) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & H \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

**Ecuación 4.7**

$$A_{12} = \begin{pmatrix} -\cos(\theta_2) & \sin(\theta_2) & 0 & -L_1 \cos(\theta_2) \\ -\sin(\theta_2) & -\cos(\theta_2) & 0 & -L_1 \sin(\theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

**Ecuación 4.8**

$$A_{23} = \begin{pmatrix} -\cos(\theta_3) & \sin(\theta_3) & 0 & -L_2 + L_3 \cos(\theta_3) \\ -\sin(\theta_3) & -\cos(\theta_3) & 0 & -L_2 + L_3 \sin(\theta_3) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{Ecuación 4.9}$$

$$A_{34} = \begin{pmatrix} \cos(\theta_4) & -\sin(\theta_4) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_4) & \cos(\theta_4) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{Ecuación 4.10}$$

$$A_{45} = \begin{pmatrix} \cos(\theta_5) & 0 & -\sin(\theta_5) & 0 \\ \sin(\theta_5) & 0 & \cos(\theta_5) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{Ecuación 4.11}$$

$$A_{56} = \begin{pmatrix} \cos(\theta_6) & 0 & \sin(\theta_6) & 0 \\ \sin(\theta_6) & 0 & -\cos(\theta_6) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{Ecuación 4.12}$$

Por lo que finalmente multiplicando las matrices 4.7, 4.8 y 4.9, se obtiene al sistema que representa a la matriz con la cual es posible determinar los parámetros que indican la posición del manipulador robótico, formando un vector, que tiene inicio en la base del sistema hasta el efector final.

$$A_{03} = \begin{pmatrix} -\cos(\theta_1)\cos(\theta_2+\theta_3) & \cos(\theta_1)\sin(\theta_2+\theta_3) & -\sin(\theta_1) & \cos(\theta_1)(L_1\cos(\theta_2)+L_2+L_3\cos(\theta_2+\theta_3)) \\ -\cos(\theta_2+\theta_3)\sin(\theta_1) & \sin(\theta_1)\sin(\theta_2+\theta_3) & \cos(\theta_1) & (L_1\cos(\theta_2)+L_2+L_3\cos(\theta_2+\theta_3))\sin(\theta_1) \\ \sin(\theta_2+\theta_3+\theta_4) & \cos(\theta_2+\theta_3) & 0 & H-L_1\sin(\theta_2)-(L_2+L_3\sin(\theta_2+\theta_3)) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{Ecuación 4.13}$$

Multiplicando las matrices 4.10, 4.11 y 4.12, se obtiene la matriz que determina la orientación del efector final.

$$A_{34} = \begin{pmatrix} \cos(\theta_6)\cos(\theta_4+\theta_5) & -\sin(\theta_4+\theta_5) & \sin(\theta_6)(\cos(\theta_4+\theta_5)) & 0 \\ \cos(\theta_4+\theta_5)\cos(\theta_6) & \cos(\theta_4+\theta_5) & \sin(\theta_6)\sin(\theta_4+\theta_5) & 0 \\ -\sin(\theta_6) & 0 & \cos(\theta_6) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{Ecuación 4.14}$$

Multiplicando las matrices 4.13 y 4.14, se obtiene la matriz que va desde la primera articulación hasta la última articulación.

$$A_{03} \cdot A_{34} = \begin{pmatrix} nx & ox & ax & Px \\ ny & oy & ay & Py \\ nz & oz & az & Pz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{Ecuación 4.15}$$

Donde:

$$nx = -\text{Cos}(\theta_1)\text{Cos}(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6)$$

$$ny = -\text{Sen}(\theta_1)\text{Cos}(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6)$$

$$nz = \text{Sen}(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6)$$

$$ox = \text{Sen}(\theta_1)$$

$$oy = -\text{Cos}(\theta_1)$$

$$oz = 0$$

$$ax = \text{Cos}(\theta_1)\text{Sen}(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6)$$

$$ay = \text{Sen}(\theta_1)\text{Sen}(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6)$$

$$az = \text{Cos}(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6)$$

$$Px = \text{Cos}(\theta_1)(L_1\text{Cos}(\theta_2) + (L_2 + L_3\text{Cos}(\theta_2 + \theta_3)))$$

$$Py = (L_1\text{Cos}(\theta_2) + (L_2 + L_3\text{Cos}(\theta_2 + \theta_3)))\text{sen}(\theta_1)$$

$$Pz = H - L_1\text{sen}(\theta_2) - (L_2 + L_3\text{sen}(\theta_2 + \theta_3))$$

Resolviendo así la cinemática directa para el manipulador robótico con las seis juntas rotacionales. Se obtienen las funciones para la posición del manipulador robótico en función de las variables articulares ( $\theta_i$ ), que están representadas por:

$$Px = \text{Cos}(\theta_1)(L_1\text{Cos}(\theta_2) + (L_2 + L_3\text{Cos}(\theta_2 + \theta_3))) \quad \text{Ecuación 4.16}$$

$$Py = (L_1\text{Cos}(\theta_2) + (L_2 + L_3\text{Cos}(\theta_2 + \theta_3)))\text{sen}(\theta_1) \quad \text{Ecuación 4.17}$$

$$Pz = H - L_1\text{sen}(\theta_2) - (L_2 + L_3\text{sen}(\theta_2 + \theta_3)) \quad \text{Ecuación 4.18}$$

Para obtener la posición del manipulador robótico en el espacio sólo se necesitan las tres primeras articulaciones. Con lo cual se prosigue a resolver la cinemática inversa.

#### 4.4 Análisis cinemático inverso para el manipulador robótico

Se necesita realizar el análisis cinemático inverso del manipulador robótico de seis grados de libertad. Para el caso de la cinemática inversa se tienen que calcular las variables articulares, para situar el efector final con respecto a un sistema de referencia {P}, se utilizarán las transformaciones entre sistemas de referencia para calcular el valor de las variables articulares.

##### 4.4.1 Expresión matemática del problema

Como sabemos, la transformación homogénea de "n" o "a" (herramienta a base) es

$${}^0T_n = {}^0A_1 {}^1T_2 \dots \dots \dots {}^{n-1}A_n$$

**Ecuación 4.19**

Consideremos específicamente un manipulador con seis grados de libertad y articulaciones rotatorias, con la notación A(θ) indicando que la matriz A es función del ángulo de rotación θ. En general sólo es posible obtener ecuaciones trascendentales bastante complicadas a partir de esta expresión para las variables θ<sub>i</sub>. La solución se complica aun mas porque soluciones en función de arcoseno ó arcocoseno no son aceptables, debido a dos factores:

- a) El coseno es cero para 90° y el seno para 180°.
- b) El seno y el coseno varían muy lentamente en la vecindad de 90° y de 180°.

Lo cual haría la solución muy poco exacta cerca de esos ángulos. Este problema se resuelve si la solución se expresa en función de arco tangente.

**Existen dos métodos principales de solución, el geométrico y analítico.**

El método geométrico se basa, esencialmente, en aplicar relaciones trigonométricas a proyecciones planas de la geometría del manipulador tridimensional. Aunque el concepto es simple, la visualización de la geometría tridimensional del manipulador y su proyección a planos se complica enormemente si se incluye la mano (en otras palabras, resulta relativamente sencilla para los primeros tres grados de libertad, pero no para los tres últimos).

$${}^0T_6 = A_1(\theta_1) A_2(\theta_2) A_3(\theta_3) A_4(\theta_4) A_5(\theta_5) A_6(\theta_6) \quad \text{Ecuación 4.20}$$

En el método analítico, se comparan elementos correspondientes en las dos matrices de la ecuación 4.20 tratando de obtener expresiones en términos de  $\text{sen}\theta/\text{cos}\theta = \tan\theta = f(\dot{a}, \dot{o}, \dot{u}, p)$  para una de las variables  $\theta_i$ . La solución para dicha variable será entonces, la expresada por la ecuación 4.21.

$$\theta_i = \arctan[f(a, o, u, p)] \quad \text{Ecuación 4.21}$$

Si no existen elementos correspondientes que produzcan este resultado, se multiplica la igualdad matricial por  $A_i^{-1}$  y se lleva a cabo nuevamente la comparación usando la ecuación resultante. El ángulo  $\theta_i$  aparece ahora en el lado izquierdo de la ecuación y es bastante posible que la razón  $\text{sen}\theta_i/\text{cos}\theta_i$  de dos términos en el lado izquierdo corresponda a la razón de dos constantes en el lado derecho.

#### 4.4.2 Método Analítico

Utilizando los parámetros de las coordenadas de los elementos del robot. Debemos sustituirlos en las ecuaciones 4.16, 4.18 y 4.19 respectivamente.

Teniendo como resultado las ecuaciones 4.22, 4.23 y 4.24.

$$X = \text{Cos}(\theta_1)(L_1\text{Cos}(\theta_2) + (L_2 + L_3\text{Cos}(\theta_2 + \theta_3))) \quad \text{Ecuación 4.22}$$

$$Y = (L_1\text{Cos}(\theta_2) + (L_2 + L_3\text{Cos}(\theta_2 + \theta_3)))\text{sen}(\theta_1) \quad \text{Ecuación 4.23}$$

$$Z = H - L_1\text{sen}(\theta_2) - (L_2 + L_3\text{sen}(\theta_2 + \theta_3)) \quad \text{Ecuación 4.24}$$

Para obtener las ecuaciones que resuelven el modelo inverso se elevan al cuadrado las ecuaciones 4.22, 4.23 y se suman obteniendo 4.25

$$x^2 + y^2 = (L_1\text{Cos}(\theta_2) + (L_2 + L_3\text{Cos}(\theta_2 + \theta_3)))^2 \quad \text{Ecuación 4.25}$$

Nuevamente se eleva al cuadrado la ecuación 4.25, de la ecuación 4.24 se despeja a H y se eleva al cuadrado, para posteriormente sumarla con la ecuación 4.25, con lo cual nos queda la ecuación 4.26

$$x^2 + y^2 + (z - H)^2 = L1^2 + (L2 + L3)^2 + 2L1(L2 + L3)\text{Cos}(\theta3) \quad \text{Ecuación 4.26}$$

Despejando  $\text{Cos}(\theta3)$  de la ecuación 4.26, e igualando a  $L2+L3$  con  $L2'$  se obtiene la ecuación 4.27

$$\text{Cos}(\theta3) = \frac{x^2 + y^2 + (z - H)^2 - L1^2 - L2'^2}{2L1L2'} \quad \text{Ecuación 4.27}$$

Donde,

$$K = \frac{x^2 + y^2 + (z - H)^2 - L1^2 - L2'^2}{2L1L2'} \quad \text{Ecuación 4.28}$$

Y conociendo de la función trigonométrica  $\text{Cos}(\theta)^2 + \text{Sen}(\theta)^2 = 1$ . Sustituyendo en función del seno obtenemos la ecuación 4.29.

$$\text{Sin}(\theta3) = \pm\sqrt{1 - (k)^2} \quad \text{Ecuación. 4.29}$$

Despejando  $(\theta3)$  de la ecuación 4.27 y 4.29 obtenemos la ecuación 4.30

$$(\theta3) = \arctan\left(\frac{\pm\sqrt{1 - (k)^2}}{k}\right) \quad \text{Ecuación 4.30}$$

Dependiendo del signo de  $\text{Sin}\theta3$  (positivo o negativo), se tiene una solución deferente (arriba o abajo de la posición), una vez que se conoce el signo, Procedemos a la obtención de  $\theta2$ . Se realiza la suma de los términos de  $Px$  y  $Py$ , y elevadas al cuadrado, de las ecuaciones 4.22 y 4.23, así como también desarrollamos la ecuación y haciendo la agrupación de los términos nos queda la ecuación 4.31.

$$\sqrt{x^2 + y^2} = (L1\text{Cos}(\theta2) + (L2\text{Cos}(\theta2)\text{Cos}(\theta3) - L2'\text{Sin}(\theta2))\text{Sin}(\theta3)) \quad \text{Ecuación. 4.31}$$

De la ecuación 4.31 y haciendo la agrupación de los términos queda la ecuación 4.32

$$H - z = (L1\text{Sen}(\theta2) + L2'\text{Cos}(\theta3))\text{Sin}(\theta2) + (L2'\text{Sin}(\theta3))\text{Cos}(\theta2) \quad \text{Ecuación 4.32}$$

Dividiendo la ecuación 4.31 entre la ecuación 4.32 se obtiene la ecuación 4.33.

$$\frac{H - z}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \frac{(L1 + L2'\text{Cos}(\theta3))\text{Sin}(\theta2) + (L2'\text{Sin}(\theta3))\text{Cos}(\theta2)}{(L1 + L2'\text{Cos}(\theta3))\text{Cos}(\theta2) - (L2'\text{Sin}(\theta3))\text{Sin}(\theta2)} \quad \text{Ecuación 4.33}$$

Dividiendo los términos del el lado derecho de la ecuación 4.33 entre  $\text{Cos}(\theta2)$  se obtiene la ecuación 4.34

$$\frac{H - z}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \frac{(L1 + L2'\text{Cos}(\theta3)) \tan(\theta2) + (L2'\text{Sin}(\theta3))}{(L1 + L2'\text{Cos}(\theta3)) - (L2'\text{Sin}(\theta3)) \tan(\theta2)} \quad \text{Ecuación 4.34}$$

Dividiendo la ecuación 4.34 entre  $L1 + L2'\text{Cos}(\theta3)$  se tiene la ecuación 4.37

$$\frac{H - z}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \frac{\tan(\theta2) + \frac{L2'\text{Sin}(\theta3)}{L1 + L2'\text{Cos}(\theta3)}}{1 - \frac{L2'\text{Sin}(\theta3)}{L1 + L2'\text{Cos}(\theta3)} \tan(\theta2)} \quad \text{Ecuación 4.37}$$

Nótese que el lado derecho de 4.37 coincide con la expresión de la tangente de la suma de dos ángulos, por lo cual se tiene lo siguiente.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{L2'\text{Sin}(\theta3)}{L1 + L2'\text{Cos}(\theta3)}\right) \quad \text{Ecuación 4.38}$$

Sustituyendo  $\alpha$  en la ecuación 4.37, queda la ecuación 4.39

$$\frac{H - z}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \frac{\tan(\theta2) + \alpha}{1 - \alpha \tan(\theta2)} \quad \text{Ecuación 4.39}$$

Y simplificando la ecuación 4.39 se obtiene la ecuación 4.40.

$$\frac{H - z}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \tan(\theta2) - \alpha \quad \text{Ecuación 4.40}$$

Despejando a  $\theta_2$  la ecuación 4.40 se tiene la ecuación 4.41

$$(\theta_2) = \arctan 2 \left( \frac{H-z}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) - \alpha \quad \text{Ecuación 4.41}$$

Para la determinación del ángulo  $\theta_1$ , es expresado en valor del vector unitario y sus componentes en función del mismo, por lo que queda la ecuación 4.42. Debido a que  $\theta_1$  sólo repercute en el plano X-Y.

$$(\theta_1) = \arctan \left( \frac{Py}{Px} \right) \quad \text{Ecuación 4.42}$$

Después de analizar los primeros tres grados que determinan la orientación del manipulador robótico, se prosigue a determinar los últimos tres grados. Para lo cual se realiza lo siguiente:

Sabiendo que:

$${}^0A_6 = {}^0A_3 {}^3A_6 = {}^0A_{3(\text{brazo})} {}^3A_{6(\text{efector})} \quad \text{Ecuación 4.43}$$

Se tiene:

$${}^3R_6 = \left( {}^0R_3 \right)^{-1} {}^0R_6 \quad \text{Ecuación 4.44}$$

Al tener la matriz de  ${}^0A_6$  y usando la ecuación anterior se obtienen los vectores unitarios de orientación del efector con respecto al sistema. De la matriz de transformación compuesta, la submatriz de orientación es igual a  ${}^3R_6$  la cual permite calcular  $\theta_4$ .

De la ecuación 4.13 se hace uso de la submatriz de 3x3 de rotación, recordando que la inversa de una matriz es igual a su transpuesta. Se expresa la inversa de  $({}^0R_3)^{-1}$

$$({}^0R_3)^{-1} = ({}^0R_3)^t = \begin{pmatrix} -\text{Cos}(\theta_1)\text{Cos}(\theta_2+\theta_3) & -\text{Cos}(\theta_2+\theta_3)\text{sen}(\theta_1) & \text{sen}(\theta_2+\theta_3) \\ \text{Cos}(\theta_1)\text{sen}(\theta_2+\theta_3) & \text{Sen}(\theta_1)\text{sen}(\theta_2+\theta_3) & \text{Cos}(\theta_2+\theta_3) \\ -\text{Sen}(\theta_1) & \text{Cos}(\theta_1) & 0 \end{pmatrix} \quad \text{Ecuación 4.45}$$

Y de la ecuación 4.15, haciendo uso de la submatriz de 3x3 de rotación.

$${}^0R_6 = \begin{pmatrix} nx & ox & az \\ ny & oy & ay \\ nz & oz & az \end{pmatrix} \quad \text{Ecuación. 4.46}$$

Haciendo uso de 4.44 se tiene a

$${}^3R_6 = ({}^0R_3)^{-1} {}^0R_6 = \begin{pmatrix} -\cos(\theta_1)\cos(\theta_2+\theta_3) & -\cos(\theta_2+\theta_3)\text{sen}(\theta_1) & \text{sen}(\theta_2+\theta_3) \\ \cos(\theta_1)\text{sen}(\theta_2+\theta_3) & \text{Sen}(\theta_1)\text{sen}(\theta_2+\theta_3) & \cos(\theta_2+\theta_3) \\ -\text{Sen}(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} nx6 & ox6 & az6 \\ ny6 & oy6 & ay6 \\ rz6 & oz6 & az6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{pmatrix} \quad \text{Ecuación 4.47}$$

El ángulo  $\theta_4$  (yaw)<sup>1</sup>, queda expresado de la siguiente forma, dividiendo el elemento (1,3) entre el elemento (2,3) se tiene lo siguiente:

$$\theta_4 = A \tan 2(R_{22}, R_{21}) \quad \text{Ecuación 4.48}$$

Para obtener a  $\theta_5$  (Roll)<sup>1</sup>

$$\theta_5 = A \tan\left(\frac{R_{31}}{C_1 \cdot R_{11} + S_1 \cdot R_{12}}\right) \quad \text{Ecuación 4.49}$$

De la expresión

también es posible obtener  $\theta_6$  (pitch)<sup>1</sup>

$$\theta_6 = A \tan\left(\frac{S_1 \cdot R_{13} - C_1 \cdot R_{23}}{-S_1 \cdot R_{12} + C_1 \cdot R_{22}}\right) \quad \text{Ecuación 4.51}$$

Con lo cual queda resuelta la cinemática directa e inversa, cuyos resultados, se analizarán a detalle en el capítulo 6, debido a que se interpretaran y aplicarán, para mover el manipulador robótico.

<sup>1</sup> Robots industriales manipuladores, Autor Rafael Treviño y Enric Vidal, Ed alfaomega.

#### 4.5 Jacobiano del manipulador robótico de 6GDL.

Se realiza el análisis del jacobiano con el fin de encontrar las singularidades que pueden existir en el manipulador robótico de 6GDL.

El jacobiano relaciona las velocidades articulares con las velocidades cartesianas del extremo. Sea  $x_i = f_i(q_1, q_2, q_3, \dots, q_n)$  para  $i = 1, 2, 3, \dots, m$  un conjunto de  $m$  ecuaciones siendo cada una de estas una función de  $n$  variables independientes. Las derivadas temporales de  $x_i$  pueden ser expresadas en función de  $\dot{q}_i$  de la siguiente forma matricial:

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ v_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\delta q_1}{\delta \theta_1} & \dots & \frac{\delta q_1}{\delta \theta_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\delta q_m}{\delta \theta_1} & \dots & \frac{\delta q_m}{\delta \theta_n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta'_1 \\ \theta'_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \theta'_n \end{pmatrix} \quad \text{Ecuación 4.52}$$

Para el caso del manipulador robótico de seis articulaciones,  $q'$  es un vector  $6 \times 1$  de velocidades de las articulaciones. Por consiguiente, en este caso,  $J$  es una matriz de  $6 \times 6$ . Por lo que se puede decir que el número de columnas de  $J$  es el número de articulaciones, y el número de filas es el número de grados de libertad.

Para la obtención de las velocidades articulares en función de las velocidades cartesianas en el extremo involucra la consideración de la inversa del jacobiano. Si la matriz no es singular puede escribirse:

$$q' = J^{-1}(q) \cdot v \quad \text{Ecuación 4.53}$$

Sin embargo, es frecuente que existan valores para que el jacobiano sea singular. Estas singularidades se presentan en los límites del espacio de trabajo, o en su interior cuando dos o más ejes de articulaciones están alineados. En las singularidades se producen pérdida de grados de libertad en el espacio cartesiano, es decir direcciones o subespacios en los que no es posible el movimiento.

#### 4.5.1 Análisis del jacobiano.

Debido a que el manipulador robótico posee seis grados de libertad, así como de seis variables articulares, y sabiendo que sólo se tomarán los tres primeros grados de libertad para el análisis de la posición, la matriz del jacobiano queda definida como una matriz de 3x3, la cual relaciona la velocidad lineal del órgano terminal con las velocidades articulares.

Considerando que el manipulador robótico tiene seis articulaciones de rotación y que sólo tomaremos tres para el análisis. Los ejes del marco de referencia se colocaran en {3} en la misma dirección que los de {2}, {1}, {0}. Por lo que se necesita encontrar la velocidad en el origen del sistema {3} y el jacobiano del manipulador.

Retomando de la ecuación 4.22 para "X" 4.23 para "Y", y 4.24 para "Z" se analizará el cálculo del jacobiano, el cual queda expresado por:

$$(J(\theta_1, \theta_2, \theta_3)) = \begin{pmatrix} \frac{\delta x}{\delta \theta_1} & \frac{\delta x}{\delta \theta_2} & \frac{\delta x}{\delta \theta_3} \\ \frac{\delta y}{\delta \theta_1} & \frac{\delta y}{\delta \theta_2} & \frac{\delta y}{\delta \theta_3} \\ \frac{\delta z}{\delta \theta_1} & \frac{\delta z}{\delta \theta_2} & \frac{\delta z}{\delta \theta_3} \end{pmatrix} \quad \text{Ecuación 4.54}$$

Donde las derivadas parciales son:

$$a_{11} = \frac{\delta x}{\delta \theta_1} = -\sin(\theta_1)(L_1 \cos(\theta_2) + (L_2' \cos(\theta_2 + \theta_3)))$$

$$a_{12} = \frac{\delta x}{\delta \theta_2} = \cos(\theta_1)(-L_1 \sin(\theta_2) - (L_2' \sin(\theta_2 + \theta_3)))$$

$$a_{13} = \frac{\delta x}{\delta \theta_3} = -L_2' \cos(\theta_1) \sin(\theta_2 + \theta_3)$$

$$a_{21} = \frac{\delta y}{\delta \theta_1} = \cos(\theta_1)(L_1 \cos(\theta_2) + (L_2' \cos(\theta_2 + \theta_3)))$$

$$a_{22} = \frac{\delta y}{\delta \theta_2} = \sin(\theta_1)(-L_1 \sin(\theta_2) - (L_2' \sin(\theta_2 + \theta_3)))$$

$$a_{23} = \frac{\delta x}{\delta \theta_3} = -L2' \sin(\theta_1) \sin(\theta_2 + \theta_3)$$

$$a_{31} = \frac{\delta x}{\delta \theta_1} = 0$$

$$a_{32} = \frac{\delta x}{\delta \theta_2} = (-L1 \cos(\theta_2) - L2' \cos(\theta_2 + \theta_3))$$

$$a_{33} = \frac{\delta x}{\delta \theta_3} = -L2' \cos(\theta_2 + \theta_3)$$

Donde el jacobiano queda de expresado como:

$$j = \begin{pmatrix} -(L1 \cos[\theta_2] + L2 \cos[\theta_2 + \theta_3]) \sin[\theta_1] & \cos[\theta_1] (-L1 \sin[\theta_2] - L2 \sin[\theta_2 + \theta_3]) & -L2 \cos[\theta_1] \sin[\theta_2 + \theta_3] \\ \cos[\theta_1] (L1 \cos[\theta_2] + L2 \cos[\theta_2 + \theta_3]) & \sin[\theta_1] (-L1 \sin[\theta_2] - L2 \sin[\theta_2 + \theta_3]) & -L2 \sin[\theta_1] \sin[\theta_2 + \theta_3] \\ 0 & -L1 \cos[\theta_2] - L2 \cos[\theta_2 + \theta_3] & -L2 \cos[\theta_2 + \theta_3] \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} \text{Ecuación} \\ 4.55 \end{matrix}$$

#### 4.5.2 Análisis inverso del jacobiano.

Se obtendrá una expresión la cual permita representar las velocidades articulares en términos de las componentes de velocidad lineal del órgano terminal. Para lo cual se tendrá que obtener la inversa del jacobiano, y que se puede representar como:

$$J^{-1} = \frac{1}{\det J} AdjJ. \quad \begin{matrix} \text{Ecuación} \\ 4.56 \end{matrix}$$

Quedando el jacobiano inverso de la siguiente forma:

$$\begin{pmatrix} \frac{\sin[\theta_1]}{L1 \cos[\theta_2] + L2 \cos[\theta_2 + \theta_3]} & \frac{\cos[\theta_1]}{L1 \cos[\theta_2] + L2 \cos[\theta_2 + \theta_3]} & 0 \\ \frac{\cos[\theta_1] \cos[\theta_2 + \theta_3] \cos[\theta_3]}{L1} & \frac{\cos[\theta_2 + \theta_3] \cos[\theta_3] \sin[\theta_1]}{L1} & \frac{\cos[\theta_3] \sin[\theta_2 + \theta_3]}{L1} \\ \frac{\cos[\theta_1] (L1 \cos[\theta_2] + L2 \cos[\theta_2 + \theta_3]) \cos[\theta_3]}{L1 L2} & \frac{(L1 \cos[\theta_2] + L2 \cos[\theta_2 + \theta_3]) \cos[\theta_3] \sin[\theta_1]}{L1 L2} & \frac{\cos[\theta_3] (L1 \sin[\theta_2] + L2 \sin[\theta_2 + \theta_3])}{L1 L2} \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} \text{Ecuación} \\ 4.57 \end{matrix}$$

Para obtener el valor de las velocidades articulares en términos de las componentes de velocidad lineal del origen del marco de referencia del órgano terminal se tendrá que multiplicar el jacobiano inverso por los valores de las velocidades lineales.

#### 4.6.2 Análisis de singularidades del manipulador robótico.

Se pueden conocer las singularidades del manipulador robótico, empleando el jacobiano, para lo cual se dice que cuando el determinante del jacobiano es igual a cero ( $\text{Det } J=0$ ). Se encuentra una configuración singular.

De la matriz, ecuación 4.55 se obtiene el determinante el cual es:

$$\text{Det}J = L1L2'(L1\text{Cos}(\theta_2) + L2\text{Cos}(\theta_2 + \theta_3))\text{Sin}(\theta_3) = 0 \quad \text{Ecuación 4.58}$$

Tomando en cuenta que la longitud de los eslabones es mayor a cero, y de la ecuación 4.57 se pueden ver que hay singularidades sólo cuando el valor de la variable articular  $\theta_3 = 0$ , al no estar  $\theta_1$  involucrada en la ecuación 4.577, se puede apreciar que no hay singularidad para esa variable articular, para el caso de  $\theta_2$ , se tiene que queda en función de  $\theta_3$ , por lo cual tampoco hay singularidad para ese punto.

---

# Capítulo 5.

## Diseño a detalle.

El diseño de ingeniería se puede definir como el proceso de aplicar las diversas técnicas y los principios científicos con el objeto de definir un dispositivo, un proceso o un sistema con suficiente detalle para permitir su realización. En este capítulo se tratan de definir y calcular movimientos fuerzas y cambios de energía afín de determinar el tamaño, las formas y los materiales necesarios para cada uno de los componentes interrelacionados del manipulador robótico.

### 5.1 Elementos mecánicos

Por necesidad se debe de diseñar al manipulador robótico elemento por elemento, es vital reconocer que la función y el desempeño de cada una de las partes, y por lo tanto su diseño, dependen de muchas otras piezas interrelacionadas, dentro del manipulador robótico. Comenzaremos con la descripción de las piezas empezando con el efector final y los eslabones.

#### 5.1.1 Análisis del efector final.

Como primer punto se analizarán las cargas, que soportarán los eslabones, se pretende que el manipulador robótico logre levantar una carga de 3Kg como máximo, pero considerando que siempre existen pérdidas para el proceso del análisis se considera una carga de 5Kg que levantará en sus primeras cuatro articulaciones con lo cual se pretende que el manipulador robótico levante los 3Kg, quedan excluidas, las últimas dos articulaciones, debido a que estas se ocuparán para realizar trabajos finos donde se requiera orientar al efector final para cargas ligeras. Tal será el caso del proceso de taladrado de piezas pequeñas.

En la figura 5.1 se muestra brevemente los elementos principales del manipulador robótico. De los cuales se realizará el análisis de las dimensiones que deberán tener los componentes del manipulador robótico, a fin de que resistan la carga de trabajo.

Se empezará por analizar al efector final, el cual tiene las siguientes características:

Masa del efector final  $m_{ef} = 1[Kg]$ , por lo que el peso es  $W_{ef} = 1[Kg] \cdot 9.81[m/s] = 9.81[N]$ , La masa que soporta de trabajo  $m_c = 5[Kg]$ , teniendo que el peso es  $W_c = 49.05[N]$  y la Longitud  $L_{ef} = 0.10[m]$ .

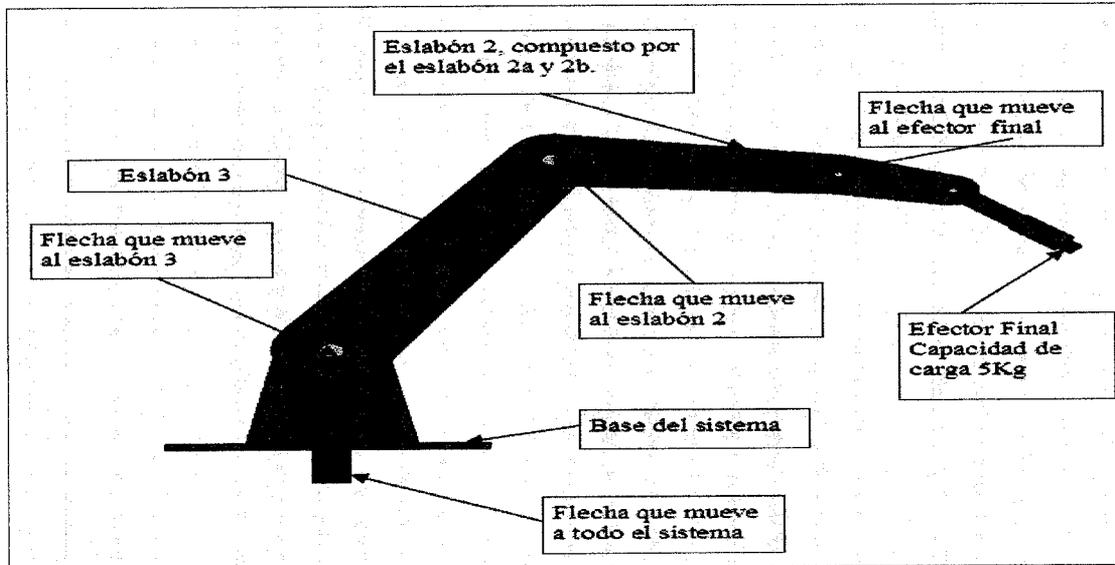


Figura 5.1 Esquema general del manipulador robótico.

El par está dado por:

$$T_{Tef} = (F_{ef})(d_{ef}) \quad \text{Ecuación 5.1}$$

Donde se tiene utilizando la ecuación 5.1

$$T_{Tef} = (W_{ef} + W_c)(L_{ef}) = 5.886[N \cdot m]$$

Se desea tener una velocidad angular de salida de  $\omega_1 = 5rpm$ , para la articulación que moverá al efector final.

La potencia neta promedio se puede calcular como:

$$P = W_{ef} \cdot L_{ef} \cdot \omega_1 \quad \text{Ecuación 5.2}$$

Con lo cual:

$$P = \frac{58.86 \times 0.10 \times 5 \times (2 \times \Pi)}{60} = 3.081[Watts]$$

Dado que habrá pérdidas de energía en el engrane de sinfín se necesita una mayor potencia de entrada, y se debe de incluir la carga pico de arranque, tomando en cuenta que esta potencia es teórica por lo que aun no se puede tomar con un 100% de seguridad.

Para lograr mover a la articulación del efector final denominada como (pitch), se utilizará un motorreductor, de corriente directa el cual tiene una velocidad angular de 125[rpm] a la entrada. Para mover a esta articulación se requiere obtener una velocidad angular de 5[rpm] a la salida. Por lo que es necesario diseñar una transmisión que logre reducir la velocidad de entrada.

Del capítulo 3 se tiene que se usara una transmisión de engrane de sinfín. Se requiere una reducción de 24:1, para obtener la velocidad angular de 5[RPM] a la salida.

#### 5.1.1.1 Diseño del engrane de sinfín para el cuarto grado de libertad.

Se utilizará un tornillo de sinfín de un sólo inicio de con un ángulo de presión de 20°. Los tornillos de sinfín serán de fundición de hierro gris, así como las ruedas helicoidales, debido que si las ruedas helicoidales fueran de bronce fundido los costos de estos se elevan hasta cuatro veces más que los de fundición gris. No habiendo ningún inconveniente en utilizar este material, ya que no giraran a altas velocidades y la carga es ligera.

Para el diseño del engrane de sinfín que mueve al efector final se propone un una distancia entre centros de  $C=0.030[m]$ , siendo  $N_w = 1$ , número de inicios del tornillo sinfín, y  $N_g = 24 = m_G$ , el número de dientes del engrane helicoidal. Para encontrar el diámetro del tornillo de sinfín adecuado se utiliza la ecuación 5.3

$$d \cong \frac{(C/0.0254)^{0.875}}{2.2} \quad \text{Ecuación 5.3}$$

$$d = 0.5258[in] \times 0.0254 = 0.01335[m]$$

El diámetro de la rueda helicoidal queda representado por:

$$d_g = 2C - d \quad \text{Ecuación 5.4}$$

$$d_g = 0.04665[m]$$

El avance está dado por:

$$L = \pi \times d_g \times \frac{N_w}{N_g} \quad \text{Ecuación 5.5}$$

$$L = 6.10 \times 10^{-3} [m]$$

Y el ángulo de avance por:

$$\lambda = \tan^{-1} \left( \frac{L}{\pi d} \right) \quad \text{Ecuación 5.6}$$

$$\lambda = 8.27^\circ$$

Como el ángulo de avance es mayor a  $6^\circ$ , no podrá ser autobloqueante, por lo que se propone el diámetro del tornillo de sinfín, para obtener un ángulo menor a  $6^\circ$ , el cual será de  $d = 0.02[m] = 0.787[in]$ , teniendo así que  $d_g = 0.04[m] = 1.575[in]$ ,  $L = 0.00523 [m] = 0.206[in]$ ,  $\lambda = 4.76364 [^\circ]$ . Las operaciones se realizan utilizando el sistema ingles debido a que en la bibliografía citada así es como se realizan estos cálculos y siguiendo la norma AGMA<sup>1</sup>.

El ancho de cara máximo para la rueda helicoidal, recomendado es:

$$F_{\max} = 0.67d \quad \text{Ecuación 5.7}$$

$$F_{\max} = 0.0134[m] = 0.5275 [in]$$

El factor del material es  $C_s = 1000$ , según la norma AGMA.  $C_m$  es un factor de corrección de razón definido también por AGMA<sup>2</sup>, donde:

$$\text{Si } 20 < m_G < 76 \quad C_m = 0.0107 \sqrt{-m_G^2 + 56m_G + 5145} \quad \text{Ecuación 5.8}$$

$$C_m = 0.822788$$

La velocidad tangencial en el diámetro de paso del tornillo sinfín es:

$$V_t = \frac{\pi n(d)}{12 \cos[\lambda]} \quad \text{Ecuación 5.9}$$

$$V_t = 24.8124 [fpm]$$

El factor de seguridad ( $C_v$ ), viene dado por:

$$C_v = 13.31(V_t)^{-0.571} \quad \text{Ecuación 5.10}$$

$$C_v = 2.1272$$

Por lo que la carga tangencial es:

$$W_{tg} = Cs \times Cm \times Cv \times dg^{0.8} \times F_{max} \quad \text{Ecuación 5.11}$$

$$W_{tg} = 1328.87[\text{lb}]$$

La potencia nominal de salida es:

$$P = \frac{nW_{tg}dg}{126000m_G} \quad \text{Ecuación 5.12}$$

$$P = 0.083[\text{hp}] = 62[\text{Watts}]$$

La potencia perdida en el acoplamiento de engrane de sinfín-corona se tiene:

$$P_{per} = \frac{V_t \times W_f}{33000} \quad \text{Ecuación 5.13}$$

$$P_{per} = 0.02132 = 16[\text{Watts}]$$

Por lo que la potencia a la entrada estará dada por:

$$P_{entr} = P + P_{per} \quad \text{Ecuación 5.14}$$

$$P_{entr} = 78[\text{watts}]$$

Teniendo también como par de torsión a la salida de:

$$T_g = W_{tg} \times \left( \frac{dg}{2} \right) \quad \text{Ecuación 5.15}$$

$$T_g = 702.46 [\text{lb-in}] = 118.712[\text{N-m}]$$

Del resultado obtenido inicialmente para el diámetro de tornillo sinfín se modifico, esto con el fin de obtener un ángulo de avance menor a  $6^\circ$ . Como se observa en la ecuación 5.15, el par de torsión es  $T_g = 118.712[\text{N-m}]$  el cual es adecuado, debido a que está muy por encima del par calculado por la ecuación 5.1. Se tiene un par de torsión nominal elevado debido a que la velocidad angular de trabajo es baja, con lo cual no se tendrá ningún problema para mover el efector final.

La potencia neta promedio se estimaba según la ecuación 5.2 que fuera suficiente con  $P = 3.081[\text{Watts}]$ , pero como se puede observar, debido al mecanismo de transmisión sinfín-corona a utilizar, no es posible utilizar un motor con esa potencia. Ya que se deben de tomar en cuenta factores externos, como en este caso es la fricción y las fuerzas para poder mover al mecanismo de sinfín corona, como se observa el resultado obtenido por la ecuación 5.14.

La potencia que debe de suministrar el motor es de 78[Watts]. El motorreductor a utilizar logra cubrir esa potencia, por lo que no hay problema para esa articulación.

### 5.1.1.2 Diseño de la flecha soporte para el efector final (4° de libertad).

Ahora se diseñará la flecha que soportará al engrane helicoidal, la cual debe de transmitir una potencia de 78[Watts], a 5[rpm]. El par de torsión y la fuerza del engrane son constantes todo el tiempo. No hay cargas axiales, el material que se utilizará será aluminio 6061 T6, con un factor de seguridad de  $N_f = 1.5$ . Se utilizará el par nominal de trabajo que para este caso se calculo por medio de la ecuación 5.1 y que es  $T_{Ief} = 5.886[N \cdot m]$  y que es uniforme a todo lo largo de la flecha, con lo cual es posible calcular la fuerza tangencial y normal del engrane como:

$$F_{g\text{Tangencial}} = \frac{T}{r_g} \tag{Ecuación 5.16}$$

$$F_{g\text{Tangencial}} = \frac{5.886[N \cdot m]}{.02[m]} = -294.3\hat{j}[N]$$

Debido a que el engrane helicoidal tiene un ángulo de presión de  $20^\circ$ , también existe una fuerza radial, la cual es:

$$F_{g\text{radial}} = F_{g\text{Tangencial}} \tan[20^\circ] \tag{Ecuación 5.17}$$

$$F_{g\text{radial}} = 107.116\hat{i}[N]$$

Se realizan el análisis de las cargas de las flechas en los planos "X-Z" y "Y-Z", mediante  $\sum F_x = 0, \sum M_x = 0$  y  $\sum F_y = 0, \sum M_y = 0$ . Donde  $D = 0.08[m]$

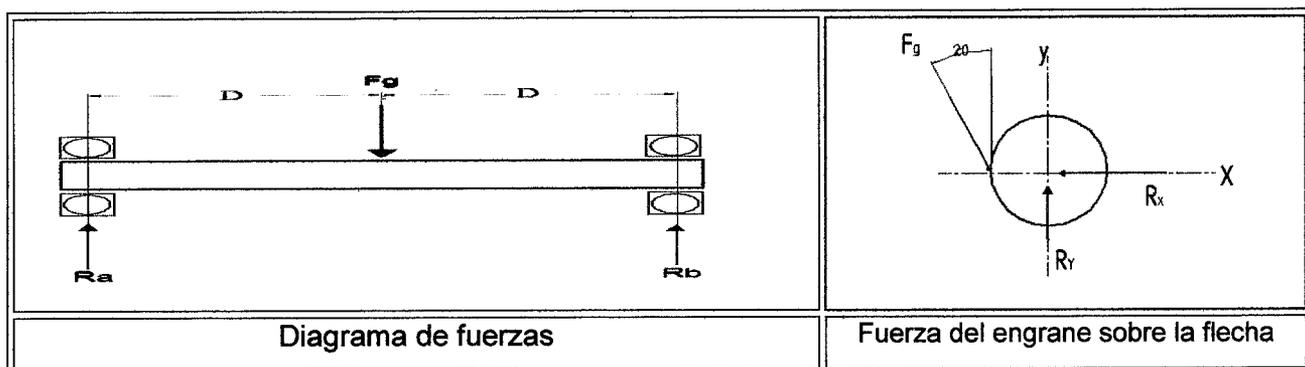


Figura 5.2 Diagramas de fuerzas que produce el engrane de sinfín sobre las flechas.

Se obtienen las reacciones en el eje "x" y en el eje "y"

$$\begin{aligned} R_{ax} &= -0.5F_{gx} = -53.5582[N] \\ R_{ay} &= -0.5F_{gy} = 147.15[N] \\ R_{bx} &= -0.5F_{gx} = -53.5582[N] \\ R_{by} &= -0.5F_{gy} = 147.15[N] \end{aligned} \quad \text{Ecuación 5.18}$$

Con estos datos se obtiene la función que describe la carga

$$q = Ra(z-0)^{-1} + Fg(z-0.08)^{-1} + Rb(z-0.16)^{-1} \quad \text{Ecuación 5.19}$$

Se integra y se obtiene la función de corte

$$V = Ra(z-0)^0 + Fg(z-0.08)^0 + Rb(z-0.16)^0 \quad \text{Ecuación 5.20}$$

Nuevamente integrándola se obtiene la función del momento.

$$M = Ra(z-0)^1 + Fg(z-0.08)^1 + Rb(z-0.16)^1 \quad \text{Ecuación 5.21}$$

De donde se obtiene que el máximo momento en "X" y "Y" está dado por:

$$M_x = 8.5692[N-m] \quad \text{Ecuación 5.22}$$

$$M_y = 11.772[N-m] \quad \text{Ecuación 5.23}$$

Utilizando el teorema de Pitágoras se obtiene el momento resultante:

$$\begin{aligned} M_T &= \sqrt{M_x^2 + M_y^2} \\ M_T &= 14.5607[N-m] \end{aligned} \quad \text{Ecuación 5.24}$$

Para los cálculos del diámetro de la flecha se utilizará aluminio, 6061 T6, con  $S_{ut} = 310[MPa]$ , y  $S_y = 276[MPa]$ , se calcula primeramente la resistencia a la fatiga corregida.

$$\begin{aligned} S_e' &= 0.4S_{ut} \\ S_e' &= 124[MPa] \end{aligned} \quad \text{Ecuación 5.25}$$

Este valor se reduce al aplicar los factores que influyen, entre las diferencias entre la pieza real y la pieza de prueba.

$$S_e = C_{carga} C_{tamaño} C_{superficie} C_{temperatura} C_{confiabilidad} S_e' \quad \text{Ecuación 5.26}$$

Donde  $C_{carga} = 1$  debido a que la carga es a torsión y flexión,  $C_{tamaño} = 1$ , debido a que aun no se conoce el tamaño real de la flecha,  $C_{superficie} = 0.85$ , como la temperatura no es elevada  $C_{temperatura} = 1$ , se supondrá una confiabilidad del 50% por lo que  $C_{confiabilidad} = 1$ ,

$$S_e = (1)(1)(0.85)(1)(1)(124) = 105.4[MPa]$$

Se calculará el diámetro de la flecha aplicando la ecuación 5.27.

$$d_{ix} = \left\{ \frac{32N_f}{\pi} \left[ \left( K_f \frac{Ma}{S_f} \right)^2 + \frac{3}{4} \left( K_{fsm} \frac{T_m}{S_y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ecuación 5.27}$$

Donde al no haber escalones en la flecha y ser uniforme  $K_f = 1$ ,  $K_{fsm} = 1$ . No hay concentración de esfuerzos, y la magnitud del momento  $M_x = 8.5692[N-m]$  y  $T_g = 5.886[N-m]$ .

$$d_{ix} = \left\{ \frac{32(1.5)}{\pi} \left[ \left( \frac{8.5692}{105400000} \right)^2 + \frac{3}{4} \left( \frac{5.886}{276000000} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{3}} = 0.0108366[m] = 10.8366[mm]$$

Para el momento  $M_y = 11.772[N-m]$  se tiene:

$$d_{iy} = \left\{ \frac{32(1.5)}{\pi} \left[ \left( \frac{11.772}{105400000} \right)^2 + \frac{3}{4} \left( \frac{5.886}{276000000} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{3}} = 0.0119866[m] = 11.98[mm]$$

Se tiene que el diámetro adecuado es de 11.98[mm]. Este diámetro se aproximará a la medida comercial en barras de aluminio estándar, que es de  $\frac{1}{2}$  [in] = 12.7[mm]. Hay que tomar en cuenta que el engrane de sinfín produce un fuerza sobre la flecha, la cual es mayor a la fuerza que se produce por la carga de trabajo. Por lo que se tendrá que verificar si el diámetro seleccionado es adecuado y resiste a la flexión que le pudiera producir la carga del engrane de sinfín.

De la ecuación 5.11 se tiene que la carga es  $W_{ig} = 1328.87[\text{lb}] = 5910.81[\text{N}]$ . De la figura 5.1 se obtiene las ecuaciones que representan la pendiente y la deflexión para la flecha bajo una carga transversal. Por medio de las ecuaciones 5.28

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI} \quad \text{Ecuación 5.28}$$

Que es la ecuación diferencial de segundo orden que gobierna la curva elástica. La cual integrándola una vez se tiene la pendiente que presenta dicha flecha.

$$EI\theta(x) = M(x)dx + c1 \quad \text{Ecuación 5.29}$$

E integrándola nuevamente se obtiene la ecuación que describe la deflexión en la flecha.

$$EIy(x) = \int_0^x \left[ \int_0^x M(x)dx + C1 \right] dx + c2 \quad \text{Ecuación 5.30}$$

Teniendo como resultado de aplicar las ecuaciones 5.28-5.30 las ecuaciones 5.31 y 5.32

$$\theta_{\max} = -\frac{3PL^2}{64EI} \quad \text{Ecuación 5.31} \quad y_{\max} = -\frac{PL^3}{128EI} \quad \text{Ecuación 5.32}$$

Para el momento de inercia  $I$  debido a que es de sección circular se tiene:

$$I = \frac{1}{4}\pi r^4, \quad E = 70[\text{GPa}], \quad \text{donde } r \text{ es el radio de la flecha.}$$

Al aplicar las ecuaciones 5.31 y 5.32 se tiene:

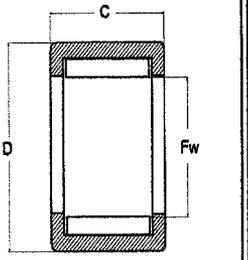
$$\theta_{\max} = -0.079349 \text{ rad} \quad y_{\max} = -0.0211599[\text{mm}]$$

Por lo que se puede apreciar que es despreciable la deflexión que se tiene, ya que es mínima la deflexión que presenta la flecha. Teniendo así, que el diámetro que se selecciono es el adecuado.

### 5.1.1.3 Selección de rodamientos.

Los rodamientos a utilizar como se menciona en el capítulo tres, serán rodamientos de agujas, los cuales tienen que tener un diámetro interior  $F_w = 1/2[in]$ . Del manual de rodamientos dimension and interchange table IKO de procedencia japonesa, se buscan los rodamientos de agujas cuyo diámetro interior sea el deseado. Encontrando que el rodamiento deseado tiene el número de código YB-88, el cual tiene las siguientes características:

**Tabla 5.1** Características de los rodamientos seleccionados.

Peso	9.1[gr]	
$F_w$	$1/2[in]$	
D	$11/16 [in]$	
C	$1/2 [in]$	
Carga dinámica	10800[N]	
Carga estática	18100[N]	

Con lo cual se puede observar que son ligeros, compactos y las cargas que soportan son adecuadas, y están muy por encima de las cargas a las que trabajara la junta rotacional del efector final, por lo que son recomendables para utilizarlos y sean complemento del manipulador robótico.

### 5.1.2 Análisis del eslabón 2.

Para el eslabón.2 se propone que el cuerpo que soportará al efector final sea solera de aluminio 6061 T6, con las siguientes dimensiones, longitud de  $L = 0.43[m]$ , un espesor  $e = 0.00635[m] = b$  y  $a = 0.050[m] = h$ , se analizara al eslabón como si fuera una viga en voladizo de sección transversal uniforme y que soporte una carga  $P_c$ , con lo cual se puede calcular la deflexión máxima bajo la carga dada ( $P_c$ ), y así definir si son adecuadas las dimensiones dadas.

### 5.1.2.1 Análisis de la solera para el eslabón 2.

Se analizan las cargas, a las que se someterán a los eslabones. Los cuales tienen un volumen  $=e \cdot a \cdot L = 1.3625 \times 10^{-4} [m]$ . La masa promedio de cada eslabón es de  $m = \rho \cdot V = 1.3625 \times 10^{-4} \times 2800 [Kg / m^3] = 0.3822 [gr]$ .

Debido a que son dos eslabones se tiene una masa de  $W_d = 0.7644 [Kg.]$ , al cual hay que sumarle lo aditamentos adicionales que lleva (0.250[Kg.]) los cuales se detallan en el capítulo 6, la masa del efector final (6[Kg.]), más el motorreductor que estará montado en los eslabones (0.750[Kg.]). Lo cual da un peso total en el eslabón No. 2 de  $W_{T2E} = P_c = 7.7644 \times 9.81 = 76.1687 [N]$

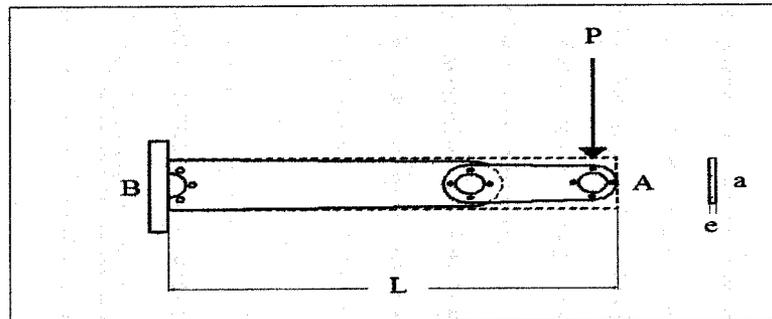


Figura 5.2 Eslabón 2 considerado como viga en voladizo.

Para lo cual de la definición de la ecuación diferencial que gobierna la curva elástica está dada por la siguiente expresión. 5.28. El producto  $EI$  se conoce como la rigidez a flexión, de la figura 5.2, sabiendo que el momento queda definido por:

$$M = -Px \quad \text{Ecuación 5.33}$$

Y sustituyendo en la ecuación 5.28 se tiene e Integrando en  $x$  se tiene,

$$EI \frac{dy}{dx} = -\frac{1}{2} Px^2 + C_1 \quad \text{Ecuación 5.34}$$

Sabiendo que  $x = L$  y  $\theta = dy/dx = 0$ , sustituyendo los valores en la integral y despejando  $C_1$  se obtiene

$$EI \frac{dy}{dx} = -\frac{1}{2} Px^2 + \frac{1}{2} PL^2 \quad \text{Ecuación 5.35}$$

Integrando ambos miembros y luego sustituyendo  $x = L$  y  $y = 0$  se obtiene  $C_2$ .

$$C_2 = 1/3PL^3$$

$$EIy = -\frac{1}{6}Px^3 + \frac{1}{2}PL^2x - \frac{1}{3}PL^3 \quad \text{Ecuación 5.36}$$

Donde se obtiene la ecuación de la curva elástica. Por lo que la deflexión y la pendiente del eslabón en el punto A queda expresado por:

$$y_A = \frac{PL^3}{3EI} \quad \text{Ecuación 5.37}$$

$$\theta_A = \left(\frac{dy}{dx}\right)_A = \frac{PL^2}{2EI} \quad \text{Ecuación 5.38}$$

Donde  $E = 70[GPa]$ ,  $I_x = \frac{1}{3}bh^3 = 2.65 \times 10^{-7}[m^4]$ . Por lo que la deflexión es

$y_A = 0.108993[mm]$ . Y la pendiente está expresada por  $\theta_A = 0.00038021 \sqrt{\phantom{x}}$

Como se puede ver es despreciable el valor que se obtiene de la deflexión, por consiguiente el ángulo de deflexión resulta ser muy pequeño. Con lo cual se puede decir que la solera propuesta para maquinar al eslabón No. 2, soportará la carga a la que trabajara el manipulador robótico sin tener algún problema de que se pueda vencer.

### 5.1.2.2 Diseño del engrane de sinfín para el segundo eslabón.

Ahora se calculará el par al que son sometidos los eslabones, para poder diseñar al engrane de sinfín, que se requiere para esta articulación. El par es:  $T_{Tef} = (P_c)(L) = 32.7525[Nm]$ . Se desea tener una velocidad angular de salida de  $\omega_1 = 5rpm$ , como en el efector final, se utilizará un motor con las mismas características del anterior. La potencia neta promedio se puede calcular de la ecuación 5.2 como:

$$P = \frac{32.7525 \times 5 \times (2 \times \Pi)}{60} = 17.1492[Watts]$$

Del resultado de la ecuación 5.15 se observa que el par nominal a la salida del engrane de sinfín es de  $T_g = 118.712[\text{N}\cdot\text{m}]$  y como esta articulación tendrá la misma velocidad angular se ocuparán un engrane de sinfín igual al que se utilizará en la junta rotacional que moverá al efector final.

### 5.1.2.3 Diseño de la flecha para el segundo eslabón 3<sup>er</sup> grado de libertad

Teniendo en cuenta que el par calculado de acuerdo a la carga para la junta rotacional que soportará al eslabón No.2, es  $T_{Tef} = 33[\text{N}\cdot\text{m}]$ , y sabiendo que el diámetro de la engrane helicoidal es  $d = 0.02[\text{m}]$ , se realiza el análisis de forma similar a al que se realizó para la flecha del efector final, y que será semejante para las demás flechas del manipulador robótico. Teniendo los siguientes resultados.  $F_{g\text{ tangencial}} = -1650\hat{j}[\text{N}]$ ,  $F_{g\text{ radial}} = 600.55\hat{i}[\text{N}]$ , se calculará el diámetro de la flecha en base a la ecuación 5.27 con los momentos  $M_x = 24.022[\text{N}\cdot\text{m}]$ ,  $M_y = 66[\text{N}\cdot\text{m}]$ . se tiene que el  $d_x = 15.6348[\text{mm}]$ ,  $d_y = 21.3248[\text{mm}]$ .

Se toma el diámetro  $d_x = 15.6348[\text{mm}]$  y aproximándolo a la medida comercial estándar de barras de aluminio se tiene que el diámetro es de  $\frac{3}{4}[\text{in}] = 19.05[\text{mm}]$ . Al aplicar las ecuaciones 5.31 y 5.32, con la carga  $W_{tg} = 5910.81[\text{N}]$  obtenida de la ecuación 5.15. Se tiene.

$$\theta_{\max} = -0.015674 \sqrt{\quad} \quad y_{\max} = -0.417974[\text{mm}]$$

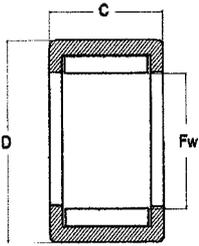
Con lo cual la deflexión es menor a un milímetro por lo que el diámetro seleccionado aguantará perfectamente la carga que produce el engrane de sinfín.

### 5.1.2.4 Selección de rodamientos.

Los rodamientos a utilizar serán de agujas, los cuales tienen que tener un diámetro interior  $F_w = 3/4[\text{in}]$ . Del manual de rodamientos *dimension and interchange table IKO* de procedencia japonesa, se buscan los rodamientos de agujas cuyo diámetro interior sea el deseado. Encontrando que el rodamiento deseado tiene el número de código YB-128, el cual tiene las que se expresan en la tabla 5.2

Debido a que son ligeros, compactos y las cargas que soportan son adecuadas, y están muy por encima de las cargas a las que trabajara la junta rotacional que soportará al eslabón No.2, son recomendables para utilizarlos y sean complemento del manipulador robótico.

**Tabla 5.2** Características de los rodamientos seleccionados,

Peso	17.8[gr.]	
$F_w$	$\frac{3}{4}$ [in]	
D	1 [in]	
C	$\frac{1}{2}$ [in]	
Carga dinámica	16600[N]	
Carga estática	26900[N]	

### 5.1.3 Análisis del eslabón 1.

Para el eslabón No.1 se propone que el cuerpo que soportará al efector final tenga una longitud de  $L = 0.35[m]$ , un espesor  $e = 0.00635[m] = b$  y  $a = 0.075[m] = h$ , se analizará al eslabón como si fuera una viga en voladizo de sección transversal uniforme y que soporte una carga  $P_{c1}$ , con lo cual se puede calcular la deflexión máxima bajo la carga dada ( $P_{c1}$ ), y así definir si son adecuadas las dimensiones dadas.

#### 5.1.3.1 Análisis de la solera para los eslabones primarios.

Se realiza un análisis similar al de los eslabones secundarios. Los cuales tienen las siguientes características. Volumen  $= e \cdot a \cdot L = 1.6668 \times 10^{-4} [m^3]$ . La masa promedio de cada eslabón es de  $m = \rho \cdot V = 1.6668 \times 10^{-4} \times 2800 [Kg / m^3] = 0.4667 [gr]$ .

Debido a que son dos eslabones se tiene una masa de  $W_d = 0.9334 [Kg.]$ , al cual hay que sumarle los aditamentos adicionales que lleva (0.250[Kg.]), la masa del efector final y la del eslabón 2 o secundario (7.8 [Kg.]), más el motorreductor que estará montado en los eslabones (0.750[Kg.]). Lo cual da un peso total en el eslabón No. 1 de  $W_{T2E} = 95.4851 [N]$ .

Por lo que la deflexión y la pendiente del eslabón queda expresado según las ecuaciones 5.37 y 5.38, con  $E = 70[GPa]$ ,  $I = \frac{1}{3}bh^3 = 8.92 \times 10^{-7}[m^4]$ .

$$y_A = \frac{PL^3}{3EI} = 0.0218314[mm] \quad \text{y} \quad \theta_A = \left(\frac{dy}{dx}\right)_A = \frac{PL^2}{2EI} = 0.0000935633 \overline{\text{rad}}$$

Como se puede ver es despreciable el valor que se obtiene de la deflexión, por consiguiente el ángulo resulta ser muy pequeño. Con lo cual se puede decir que la solera propuesta para maquinar al eslabón 1. Soporta la carga a la que trabajara el manipulador robótico sin tener algún problema de que se pueda vencer.

### 5.1.3.2 Diseño del engrane de sinfín para el primer eslabón.

El par que se ejerce en el eslabón uno es  $T_{E2} = 35[Nm]$ . La velocidad angular será de 4[rpm].

Teniendo una potencia teórica de  $P = \frac{35 \times 4 \times (2 \times \Pi)}{60} = 14.6607[Watts]$ .

Debido a que es mayor la carga que soporta se propone un engrane helicoidal de 36 dientes, el tornillo de sinfín es de un inicio con ángulo de presión de 20°, el engrane helicoidal y el tornillo de sinfín serán de fundición gris. Realizando un análisis similar al que se hizo para el engrane del efector final se obtiene los siguientes valores. Utilizando las ecuaciones de la 5.3 a la 5.15.

**Tabla 5.3** Características más importantes de engrane de sinfín.

Diámetro tornillo sinfín	$d = 28[mm]$
Diámetro engrane helicoidal	$d_g = 72[mm]$
Potencia nominal salida	$P_{sal} = 154.422[Watts]$
Potencia nominal entrada	$P_{entr} = 195.65[Watts]$
Par de torsión a la salida	$T_g = 395.926[Nm]$
Carga tangencial	$W_{tg} = 2454.76[lb]=9819.04[N]$

### 5.1.3.3 Diseño de la flecha soporte para el eslabón 1 (2° grado de libertad).

Se diseñará la flecha que soportará al engrane helicoidal, junto con los rodamientos, la cual deberá de transmitir una potencia de 155[Watts], a 4[rpm]. El par de torsión y la fuerza del engrane son constantes todo el tiempo. No hay cargas axiales, el material que se utilizará será aluminio 6061 T6, con un factor de seguridad de  $N_f = 1.5$ . Se sabe que el par nominal de salida del engrane es:  $T_g = 35[\text{Nm}]$ ,

Del resultado obtenido de la ecuación 5.27, para el valor de  $M_x = 45.1613[\text{N-m}]$  y  $M_y = 16.4374[\text{N-m}]$  que son los momentos que se producen por la carga de trabajo más los eslabones, se obtiene los diámetros  $d_{1x} = 14.2766[\text{mm}]$ , un diámetro de  $d_{1y} = 18.9063$ . Se toma el diámetro  $d_{1y} = 18.9063$  el cual se acercará a  $\frac{3}{4} [\text{in}] = 19.05[\text{mm}]$ . Al aplicar las ecuaciones 5.31 y 5.32, con la carga  $W_{ig} = 9819.04[\text{N}]$  se tiene:

$$\theta_{\max} = -0.0260397 \sqrt{\quad} \quad y_{\max} = -0.694393[\text{mm}]$$

Con lo cual la deflexión es menor a un milímetro por lo que el diámetro seleccionado aguantará perfectamente la carga que produce el engrane de sinfín a pesar de ser mayor la carga. Por ser el mismo diámetro de la flecha de la junta rotacional 2, se utilizarán los rodamientos que se especifican en la tabla 5.2.

### 5.1.4 Análisis de la Flecha para la base del brazo robótico(1° grado de libertad).

Se diseñará la flecha que soporta a todo el manipulador robótico, la cual permite el movimiento en el plano X-Y. La flecha soporta una carga de 10[Kg], pero tiene dos apoyos por lo que la carga se divide en dos siendo la carga de 5[Kg], y a una distancia de 0.08 [m] del centro de la flecha, la carga es axial. Como se muestra en la figura 5.3

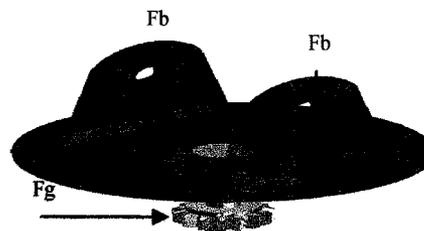


Figura 5.3 Fuerzas sobre la Flecha base del manipulador

#### 5.1.4.1 Diseño del engrane de sinfín

Se diseñará el engrane de sinfín de acuerdo a la velocidad angular de  $\omega = 8[rpm]$ , con lo cual se utilizará el mismo motorreductor, que en los tres casos anteriores, por lo cual se necesita un engrane de 15 dientes. El tornillo de sinfín es de un inicio con ángulo de presión de  $20^\circ$ , el engrane helicoidal y el tornillo de sinfín serán de fundición gris. El par al que es sometido la flecha es de  $T_b = 7.848[Nm]$ , y la potencia promedio es de. Utilizando las ecuaciones de la 5.3 a la 5.15 se obtiene lo siguiente.

**Tabla 5.4 Características de engrane de sinfín.**

Diámetro tornillo sinfín	$d = 28[mm]$
Diámetro engrane helicoidal	$d_g = 56[mm]$
Potencia nominal salida	$P_{sal} = 206.19[Watts]$
Potencia nominal entrada	$P_{entr} = 239.76[Watts]$
Par de torsión a la salida	$T_g = 247.787[Nm]$

#### 5.1.4.2 Diseño de la flecha y selección de rodamientos.

La flecha será sometida a un par de torsión de  $T_g = 247.787[Nm]$ , se sabe que el diámetro del engrane helicoidal es  $d_g = 56[mm]$ . Teniendo así que  $M_x = 193.25[N-m]$  y  $M_y = 529.14[N-m]$ , sustituyendo los valores de los momentos y del para en la ecuación 5.27 se obtiene los siguientes diámetros,  $d_{1x} = 29.8548[mm]$ ,  $d_{1y} = 40.4732[mm]$ , aplicando las ecuaciones 5.28-5.30 el diámetro de la flecha será de  $d_b = 25.4[mm]$ , pero como debe de soportar a la base circular se maquinara de manera que en la parte de arriba tenga un diámetro de  $50[mm.]$  y escalonada para que en la parte de abajo tenga el diámetro solicitado. Por lo que los rodamientos utilizados tendrán un diámetro de  $50[mm.]$  de interior y serán de bolas, ya que sólo servirán como apoyo para disminuir la fricción y permitir que gire libremente la flecha.

## **5.2 Dispositivos electrónicos.**

Una vez definidos los sistemas mecánicos se especificaran los componentes que permiten realizar los movimientos de dichas piezas. Para el funcionamiento del manipulador robótico se necesita una PC, esto con el fin de realizar un ambiente gráfico el cual permita realizar la interfaz entre el usuario y el manipulador mediante un programa amigable al cual el usuario pueda darle instrucciones de una manera sencilla. Empezaremos por definir la computadora personal.

### **5.2.1 La computadora personal**

Una computadora es un sistema digital con tecnología de microelectrónica capaz de procesar datos a partir de un grupo de instrucciones denominado programa. La estructura básica de una computadora incluye microprocesador (CPU), memoria y dispositivos de entrada/salida (E/S).

Por medio de la PC se podrá realizar la comunicación entre el manipulador robótico y el usuario. Para lo cual se realizará un programa en el software denominado Visual Basic, el cual permite realizar la comunicación serial RS-232, por lo que será posible entablar una comunicación entre el microcontrolador y la computadora, se elige este software debido a que permite realizar un interfaz gráfica de usuario que lo hace muy fácil de manejar. La palabra "Visual" hace referencia al método, que se utiliza para diseñar la interfaz gráfica de usuario consistente en arrastrar y colocar objetos prefabricados en su lugar dentro de un formulario evitando así tener que escribir numerosas líneas de código.

La palabra "Basic" hace referencia al lenguaje del mismo nombre. Debido a que Visual Basic contiene numerosas instrucciones funciones y palabras clave relacionadas con la interfaz gráfica de Windows, por lo cual permite crear aplicaciones útiles con sólo aprender unas pocas palabras. Por lo cual se selecciono este lenguaje.

### **5.2.2 Comunicación RS-232**

Se utilizará la comunicación serial para transmitir datos en formato ASCII. Para realizar la comunicación se utilizan 3 líneas de transmisión: (1) Tierra (o referencia), (2) Transmitir, (3) Recibir.

---

Las características más importantes de la comunicación serial son la velocidad de transmisión, los bits de datos, los bits de parada, y la paridad.

Para que dos puertos se puedan comunicar, es necesario que las características sean iguales. El puerto serial envía y recibe bytes de información un bit a la vez.

**Velocidad de transmisión (*baud rate*):** Indica el número de bits por segundo que se transfieren, y se mide en baudios, el programa en Visual se configura a 9600[bits/s]

**Bits de datos:** Se refiere a la cantidad de bits en la transmisión. Se utilizará el ASCII extendido que es de 0 a 255, lo que utiliza 8 bits. Un paquete se refiere a una transferencia de un byte.

**Bits de parada:** Usado para indicar el fin de la comunicación de un sólo paquete. Los bits de parada no sólo indican el fin de la transmisión sino además dan un margen de tolerancia para esas las diferencias de de los relojes.

**Paridad:** Es una forma sencilla de verificar si hay errores en la transmisión serial. Existen cuatro tipos de paridad: par, impar, marcada y espaciada. La opción de no usar paridad alguna también está disponible.

#### 5.2.2.1 Limitaciones de la comunicación RS-232

La RS-232 C tiene una limitación de distancia máxima de 15 metros. La norma RS-232 especifica que la capacidad en la línea no debe superar los 2.500 picofaradios. Los cables que se suelen utilizar tienen una capacidad de 120 a 150 picofaradios por metro de longitud

Una segunda limitación es su método de toma de tierra o retorno común. Este método, llamado transmisión no balanceada, si hay diferencia de potencial entre los dos extremos del cable, se reduce la región de transición entre marca y espacio. Cuando ocurre esto, existe la posibilidad que no se interpreten bien los distintos estados de la señal. Otra dificultad es su máximo de 20 Kb/s para la velocidad de transmisión.

### 5.2.3 Utilización del microcontrolador PIC16F877.

Como se mencionó en el capítulo tres se utilizará el microcontrolador PIC 16F877, el cual será el encargado de poder recibir las instrucciones de la PC. Por medio de la comunicación serial RS-232, para lo cual dicha comunicación estará entablada en código ASCII.

Se tendrá que configurar al micro para que pueda operar por medio de la interrupción por recepción de datos (RS-232). Se utilizará la comunicación serie asíncrona para lo cual se configura al modulo USART, llamado SCI (Serial Communications Interface), y que funcionará en el modo Asíncrono (Full Duplex, bidireccional).

El microcontrolador PIC 16F877 posee un **convertidor A/D** de 10 bits de resolución y 8 canales. El cual se configurara para poderlo utilizar. Así como el **Modo de modulación de ancho de pulso (PWM)**.

Se utilizará un microcontrolador para cada uno de los primeros cinco motorreductores, con lo cual cada microcontrolador tendrá conectado un potenciómetro lineal para censar las posiciones de la junta rotacional, activará una etapa de potencia que accionará al motorreductor y podrá recibir datos por medio de la comunicación serial RS-232.

Los otros dos motores restantes están conectados a un sólo microcontrolador, debido a que su campo de acción es muy limitado y sólo uno de estos lleva un potenciómetro para su posicionamiento que es el motor que activa la articulación denominada como Yaw, el último motor es el motor que abre y cierra la pinza del efector final.

Todos los microcontroladores estarán conectados a un circuito integrado cuya función es convertir las señales que llegan de la PC en TTL, para que el microcontrolador pueda leer y recibir dichas señales. Además que conectando de esta forma a los microcontroladores les llegará la información al mismo tiempo, con lo cual cada uno de microcontroladores tomará la información que necesite desechando la información que le sea basura.

Esto es con el fin de que el tiempo de respuesta entre la PC y el microcontrolador sea más rápida evitando así perder tiempo con alguna otra forma de comunicación entre los micros como la comunicación  $I^2C$ . Por consiguiente la programación se simplifica un poco.

En la figura 5.4 se representa el diagrama de bloques, donde se muestra la conexión de cada microcontrolador.

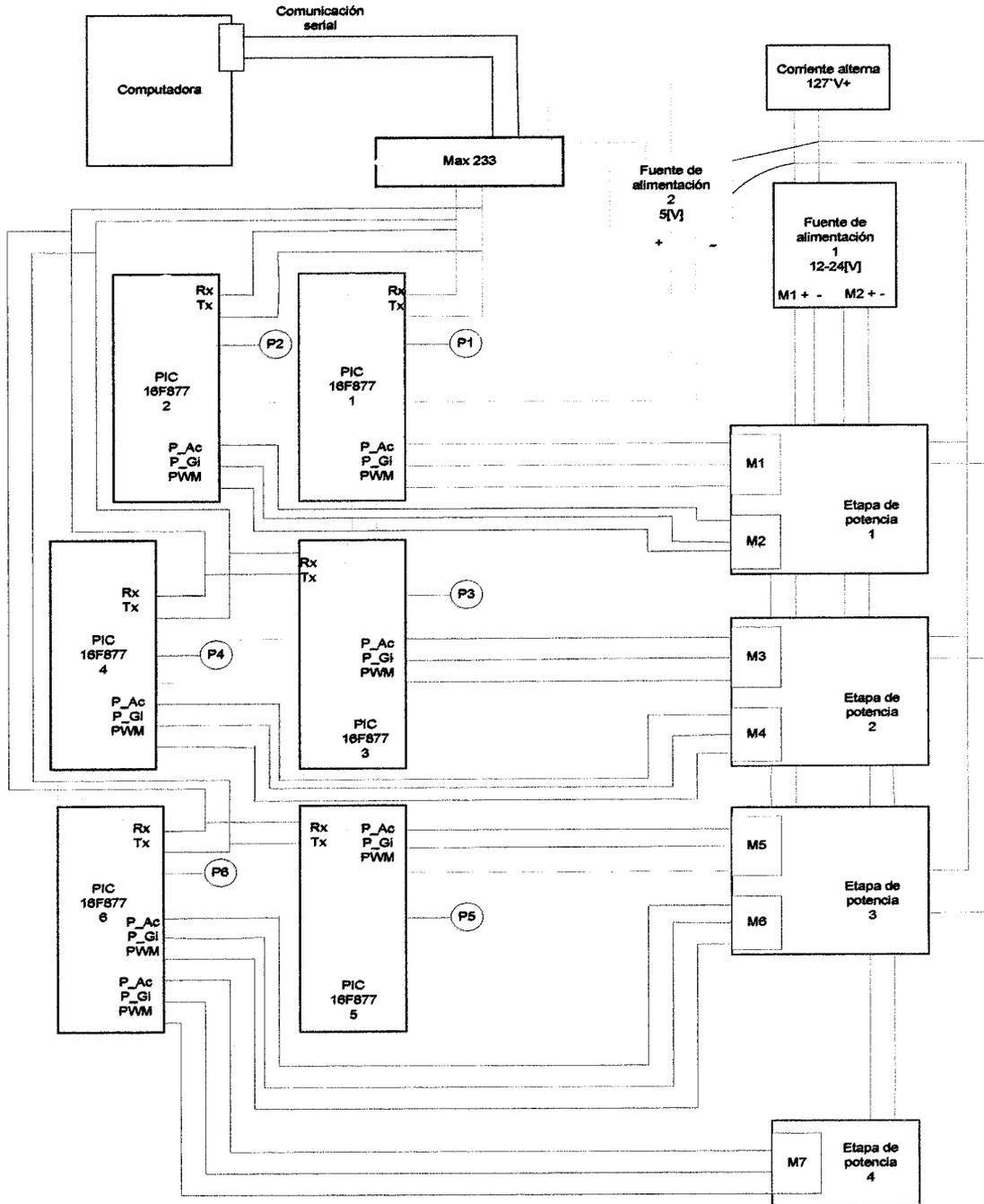


Figura 5.4 Diagrama de bloques implementación de los microcontroladores.

---

Del diagrama de bloques 5.4, se observa que del microcontrolador uno al microcontrolador cinco tendrán las mismas características, por lo que su programación será semejante. Cada uno de estos microcontroladores manda tres señales a las etapas de potencia, la señal P\_Ac, que es la que activa a la etapa de potencia mandando un cero lógico, la señal P\_Gi invierte el giro del motor dependiendo si el valor que le llega es uno o cero, y por último la señal PWM, que como su nombre lo indica es la señal que manda los pulso para variar la velocidad del motor.

Cada microcontrolador censa un potenciómetro lineal, por medio del convertidor analógico digital, dependiendo del valor que este recibe mandará una señal de PWM, que hará que el motor se mueva. Se utiliza al microcontrolador PIC16F877, debido a su capacidad de memoria, cuenta con un convertidor A/D de 10 bits de resolución, debido a que si se utiliza otro microcontrolador más pequeño es posible tener que agregarle una memoria adicional, con lo cual se incrementan los costos y además también la programación.

El microcontrolador seis estará encargado de accionar dos motores, en ocasiones al mismo tiempo. Por lo que se utilizarán las dos salidas de PWM que trae el microcontrolador, sólo censa un potenciómetro lineal debido a que el efector final no utiliza potenciómetro para su posición.

#### **5.2.4 Actuadores.**

Las actuadores eléctricos utilizados son ocho motorreductores, de los cuales cuatro tienen las mismas características. Estos motorreductores tienen acoplado un engrane de sinfín a la salida de la flecha del motor.

Las especificaciones de los cuatro motores utilizados para los primeros cuatro grados de libertad se detallan en la tabla 5.5.

**Tabla 5.5** Características de los 4 motoreductos G.

Motorreductor con escobillas de imán permanente	Especificaciones.
Voltaje	De 5[V] a 24[V]
Corriente	10[A] Como máximo.
Potencia	240[Watts]
Dimensiones	Cilindro de diámetro 60[mm.] y largo 150[mm.]
Tipo de transmisión	Engrane de sinfín.
Velocidad de salida.	125[rpm]

El quinto motor es un motor sin escobillas que trabaja a 12[V] y 5[A] como máximo, este motorreductor consta de una caja con una transmisión de engranes, a diferencia de los cuatro anteriores que trabajan con un engrane de sinfín. Este motor proporciona el quinto grado de libertad llamado el Yaw o derrape, su velocidad angular de salida es de 30[rpm].

Para el sexto grado de libertad llamado Roll o balanceo, se utilizo un motorreductor que también tiene un juego de engranes, pero es de forma más compacta que el anterior, siendo también un motorreductor sin escobillas que trabaja a 12[V] y 5[A] como máximo, con una velocidad de salida de 60[rpm].

Para el efector final se utiliza un motorreductor pequeño que puede trabajar desde 3[V] hasta 24[V] y 3[A], como máximo. Este cuenta también con un juego de engranes para su transmisión. Tiene una velocidad de salida de 125[rpm], este motor es sin escobillas.

Para la herramienta rotaria que funcionará como taladro se ocupara un motor semejante al que se utiliza en el efector final.

**5.2.5 Etapas de potencia para los actuadores eléctricos.**

Los motorreductores tienen una potencia de 120 – 240 [Watts], el voltaje al que pueden trabajar es de 12[V] a 24[V], y a una corriente máxima de 10[A], con lo cual partiendo de estas características se selecciona la etapa que mejor cubra las necesidades. Se desea mandar tres señales a la etapa de potencia para activar el motorreductor, una señal de activar motor, una de inversión de giro y por último la señal de PWM.

Se adquirieron tres etapas de potencia para los motorreductores, las cuales tiene las siguientes características:

- Pueden trabajar con un voltaje mínimo de 3[V] hasta un voltaje máximo de 30[V].
- Soportan una corriente máxima de 10[A].
- Cuentan con un sensor de corriente el cual al calentarse los transistores comienzan los ventiladores que trae la etapa a funcionar, para reducir el calentamiento de la tarjeta.
- Cada tarjeta puede controlar dos motores.
- Cuentan con un botón para el reset en caso de falla.
- Para activar a los transistores la señal que manda el microcontrolador primero debe de pasar por un dispositivo electrónico. Para verificar si la información que se le manda es la correcta y activar al motor de una forma segura.
- Cuenta con bornes en los cuales se debe de conectar el voltaje para que trabajen los motores.
- Cuenta con su propia fuente de 5[V], para activar a los ventiladores y a los demás integrados.
- Debe de alimentarse a la toma corriente de 127[V] de CA.
- Cuenta con 10 pines, los cuales están distribuidos de la siguiente forma

**Tabla 5.6** Distribución de salidas de la tarjeta.

Pin1 M1	Pin 2 M1	Pin 3 M1	Pin 4 M1	Pin5 M2	Pin 6 M2	Pin 7 M2	Pin 8 M2	Pin 9	Pin 10
Señal de error	Activar Motor	Inversión de giro	Señal de PWM	Señal de error	Activar Motor	Inversión de giro	Señal de PWM	GND	VCC

Por lo que para el funcionamiento de la tarjeta se requiere que el microcontrolador le mande 3 señales las cuales son:

1. Señal de activar motor la cual sólo se activa cuando el micro le manda un cero lógico.
2. Señal de invertir giro, la cual responde con un 0 giro en sentido horario, con un 1 el giro es en sentido antihorario.
3. Señal de PWM.

El microcontrolador también debe de estar configurado en un pin como entrada debido a que en caso de que la tarjeta llegara a tener una falla esta manda una señal de un 1 lógico por medio del pin 1 y el pin 5 de la tarjeta, con lo cual el microcontrolador podrá mandar una señal a la computadora para que el operario pueda percatarse de alguna falla.

Se deben de conectar el pin 9 y el pin 10 a Gnd y a Vcc, respectivamente para que pueda trabajar la tarjeta, que es el mismo voltaje al que son conectados los microcontroladores que en este caso son 5[V].

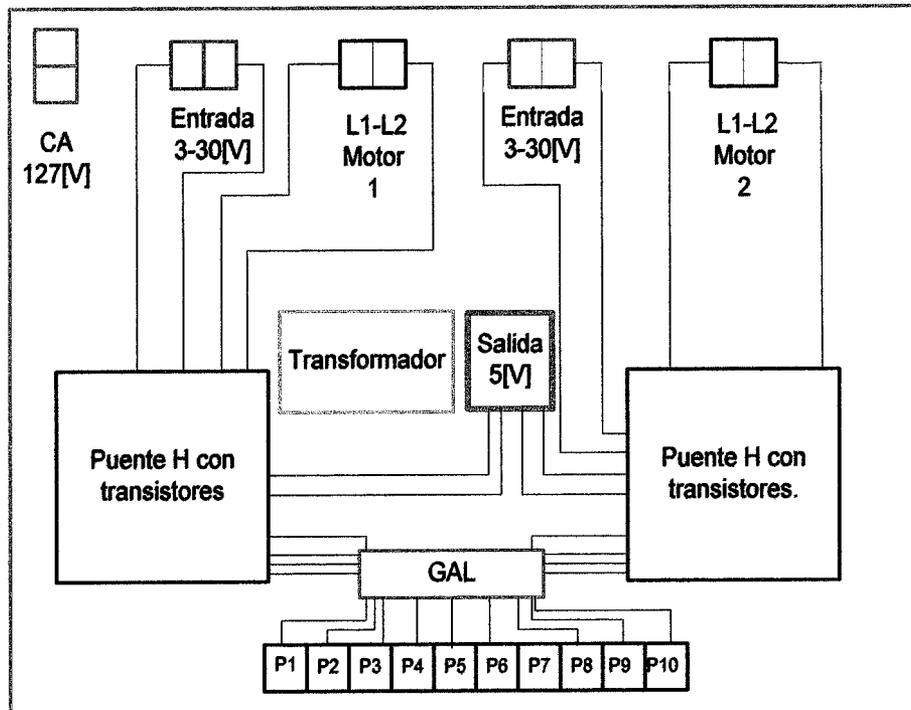


Figura 5.6 Diagrama de bloques de la etapa de potencia.

## 5.2.6 Fuentes de alimentación corriente directa.

### 5.2.6.1 Fuente conmutadas

Debido al amperaje que se maneja se utilizarán fuentes de PC, las cuales son fuentes que pueden suministrar un amperaje alto y es muy difícil que se dañen debido a que son fuentes conmutadas. Se utilizarán dos debido a que una será la encargada de suministrar el voltaje de operación de los motores, y la otra se encargara de suministrar el voltaje a los microcontroladores. Se realiza una breve descripción de cómo es que funciona una fuente conmutada.

La fuente de alimentación conmutada es más compleja que las convencionales, pero consiguen unos rendimientos mucho mejores, de un 80%, frente al 40% o 50% de las otras. Esto, unido al progresivo avance de la integración de circuitos, ha conseguido que se utilicen en multitud de equipos electrónicos de consumo.

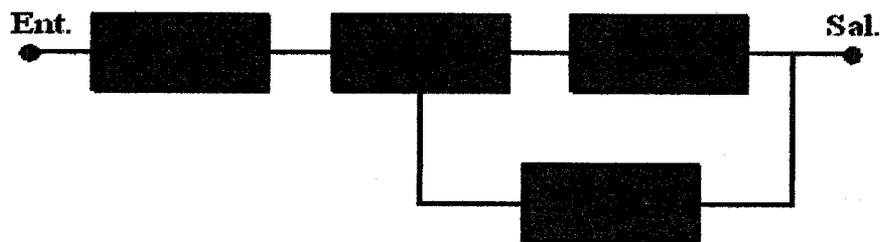
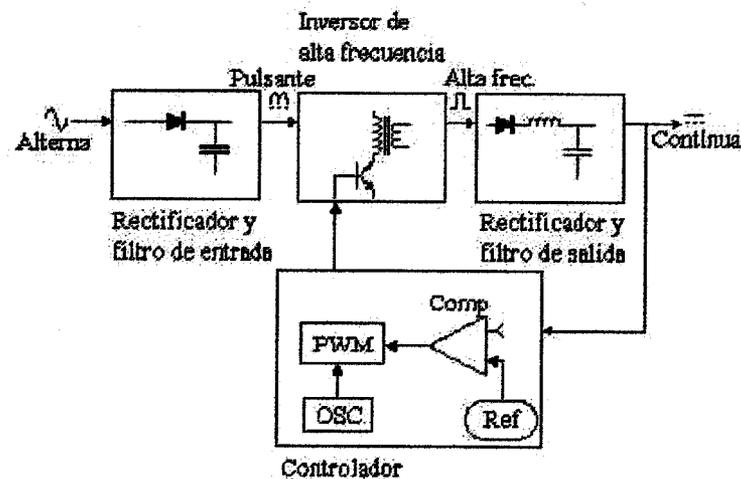


Figura 5.7 Diagrama a bloques la fuente conmutada.

Como se puede apreciar en el esquema de bloques, se rectifica la corriente alterna de la red para alimentar un circuito de conmutación, éste, mediante un transistor u otro elemento semiconductor trabajando al corte y a la saturación, genera una onda rectangular de una frecuencia de entre 20 y 50 kHz. La señal de alta frecuencia es nuevamente rectificadas y filtrada para obtener la tensión final de salida.

Para regular la salida se utiliza un lazo de realimentación que mediante un circuito de control ajusta la frecuencia de la onda rectangular o la duración de sus semiperiodos de corte y de conducción.

Las fuentes conmutadas son de circuitos relativamente complejos, pero se puede siempre diferenciar cuatro bloques constructivos básicos:



**Figura 5.8** Diagrama eléctrico a bloques la fuente conmutada.

En el primer bloque rectificamos y filtramos la tensión alterna de entrada convirtiéndola en una continua pulsante. El segundo bloque se encarga de convertir esa continua en una onda cuadrada de alta frecuencia (10 a 200 kHz.), La cual es aplicada a una bobina o al primario de un transformador. Luego el segundo bloque rectifica y filtra la salida de alta frecuencia del bloque anterior, entregando así una continua pura.

El cuarto bloque se encarga de comandar la oscilación del segundo bloque. Este bloque consiste de un oscilador de frecuencia fija, una tensión de referencia, un comparador de tensión y un modulador de ancho de pulso (PWM). El modulador recibe el pulso del oscilador y modifica su ciclo de trabajo según la señal del comparador, el cual coteja la tensión continua de salida del tercer bloque con la tensión de referencia.

### 5.3 Control del manipulador robótico de 6GDL.

Para realizar el control del manipulador robótico se llevara a cabo mediante el controlador proporcional el cual es un controlador lineal. La acción de control es directamente proporcional al error. Para este caso se tomará el error de la posición angular. El cual convierte un comando de posición de entrada en respuesta de posición de salida.

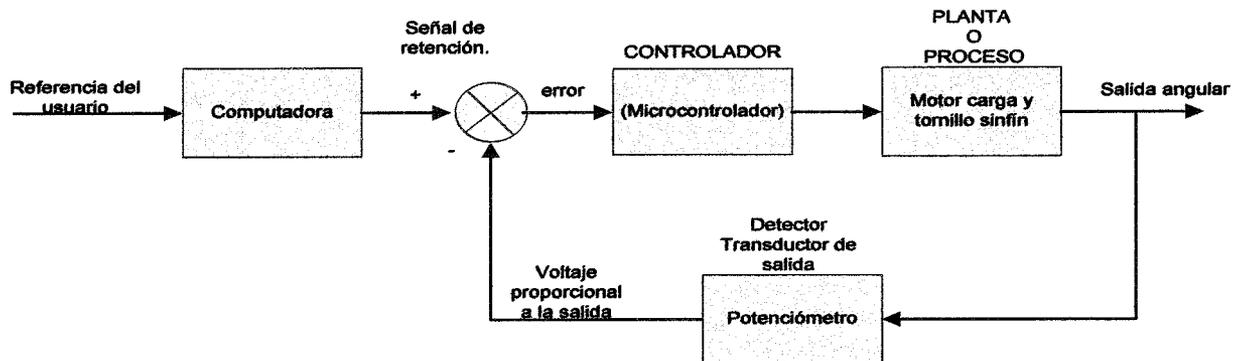


Figura 5.9 Diagrama de bloques del sistema de control

El propósito de este sistema es que cada junta rotacional que mueve a las articulaciones por medio del motor, lleguen al ángulo de entrada deseado. Para lo cual se realiza las siguientes operaciones: el desplazamiento angular de la salida es convertido en voltaje, por el potenciómetro de la trayectoria de retroalimentación.

El microcontrolador realiza la comparación entre el valor del potenciómetro y del valor de la entrada angular por medio del convertidor A/D. Dependiendo del valor que se tenga se amplifica o reduce la señal de actuación, la cual excita a la planta.

El sistema opera de manera normal para llevar el error a cero. Cuando la entrada y la salida son iguales, el error será cero, y el motor no girará.

No se toman en cuenta los factores dinámicos del motor, sólo el desplazamiento angular del potenciómetro, el cual puede ser leído por el convertidor analógico del microcontrolador, realizando estas operaciones necesarias para poder enviar un dato K, el cual es un valor que varía conforme avanza el potenciómetro y así mismo se envía una señal en PWM al motor para que este trabaje y llegue a la posición deseada.

---

#### 5.4 Programación de movimientos del manipulador robótico.

Primeramente se debe de definir el problema, por lo que este programa debe de poder realizar un enlace entre la computadora y el microcontrolador, el cual a su vez estará encargado de mover los actuadores y de registrar las lecturas de los sensores, para poder llevar al manipulador robótico a la posición que se desee. El problema consiste en que el robot de 6GDL debe de ser capaz de mover cada una de sus articulaciones de forma independiente para llevarlos a una posición deseada en este caso para el seguimiento de una trayectoria.

Para la simulación del proceso industrial deberá de guardar los valores que el usuario le indique, para que posteriormente el manipulador realice por si mismo la trayectoria descrita cuantas veces se requiera. Se ocupara la **programación por guiado**.

La programación por guiado consiste en desplazar al manipulador robótico a un sistema de referencia asociado a este, de forma que alcance las configuraciones deseadas a la vez que se registran sus valores. Es decir el manipulador robótico de 6GDL, actuará como un digitalizador de posiciones en un espacio cartesiano para poder realizar la simulación de movimientos. Para lo cual es necesario realizar una especie de botonera en el lenguaje de programación de Visual Basic, la cual permitirá poder mover de forma independiente cada una de las articulaciones del manipulador robótico, y posteriormente guardara los valores.

Los movimientos que realizan para el seguimiento de una trayectoria están respaldados por los modelos que se obtuvieron de la cinemática directa e inversa, las ecuaciones obtenidas de cada junta rotacional se programan en Visual Basic, con el propósito de sólo indicar la posición inicial y final en coordenadas cartesianas. Visual Basic tomará los valores los interpretará y mandara los valores iniciales y finales que deberán de tener los potenciómetros para que llegue a su destino.

##### 5.4.1 Especificaciones de las entradas y salidas.

Para que la computadora se comunique con los microcontroladores será necesario utilizar la comunicación serial RS-232, con sólo las dos líneas de Rx (recepción de datos) y Tx (transmisión de datos) será posible enviarles la información a los seis microcontroladores.

---

Para cada microcontrolador se necesitan dos entradas, una para leer el valor del potenciómetro, y otra por donde le llega el dato de la PC, y como salidas se necesitan cuatro. Una para activar la etapa de potencia que mueve al motor, la segunda para invertir el giro del motor, la tercera para mandar la señal de PWM del motor, la cuarta para transmitir datos por comunicación serial a la PC.

#### **5.4.2 Diseño del programa para Visual Basic.**

Se debe de realizar un panel visual el cual mostrara una botonera que permite accionar a los ocho motores utilizados de forma independiente. Estos permiten mover cada motor de dos formas la primera permite que cada motor sufra un desplazamiento largo, y la segunda permite un desplazamiento fino. Deben de existir dos botones adicionales uno de ellos denominado guardar \_ valores cuya función es la de enviarle a al microcontrolador la función de guardar valores de los potenciómetros del manipulador robótico una vez que este halla sido desplazado a la posición deseada. Posteriormente el otro botón denominado realizar \_ rutina al ser accionado tendrá, la función de mandar al manipulador robótico a posición inicial y realizar la operación que se había guardado con anterioridad. Esto será para el caso de la programación por guiado.

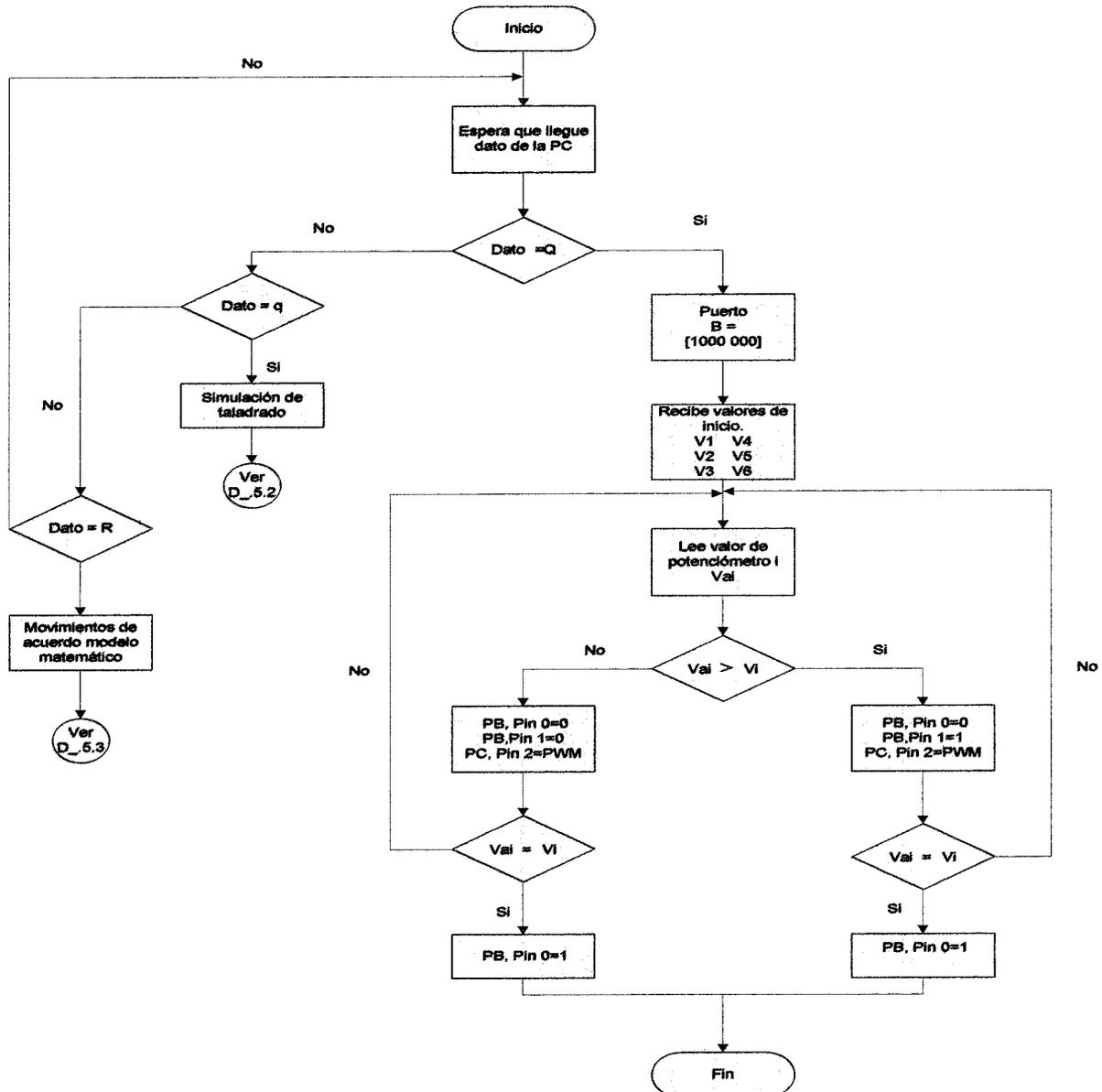
Para la secuencia de una trayectoria se mostrará un panel en el cual se podrán escribir los valores de las pociones iniciales y finales, para que Visual Basic interprete los valores y los mande al microcontrolador al accionar el botón denominado como mandar \_ valores. Debe de existir un botón el cual al ser accionado el manipulador robótico se dirigirá a su posición de inicio denominado como home. Y otro botón que de denominado como simulación el cual mandará la señal al microcontrolador para que realice la simulación de taladrado.

#### **5.4.3 Diseño y codificación del programa para el microcontrolador.**

El diagrama de flujo 5.1 muestra como se deben de mover las juntas rotacionales para llegar a los eslabones a la posición de inicio. El programa principalmente checa si el valor del potenciómetro es igual al valor preestablecido que se propone como inicio, cada microcontrolador realizará los mismos pasos por lo cual el diagrama de flujo se extrapola para los cuatro microcontroladores restantes.

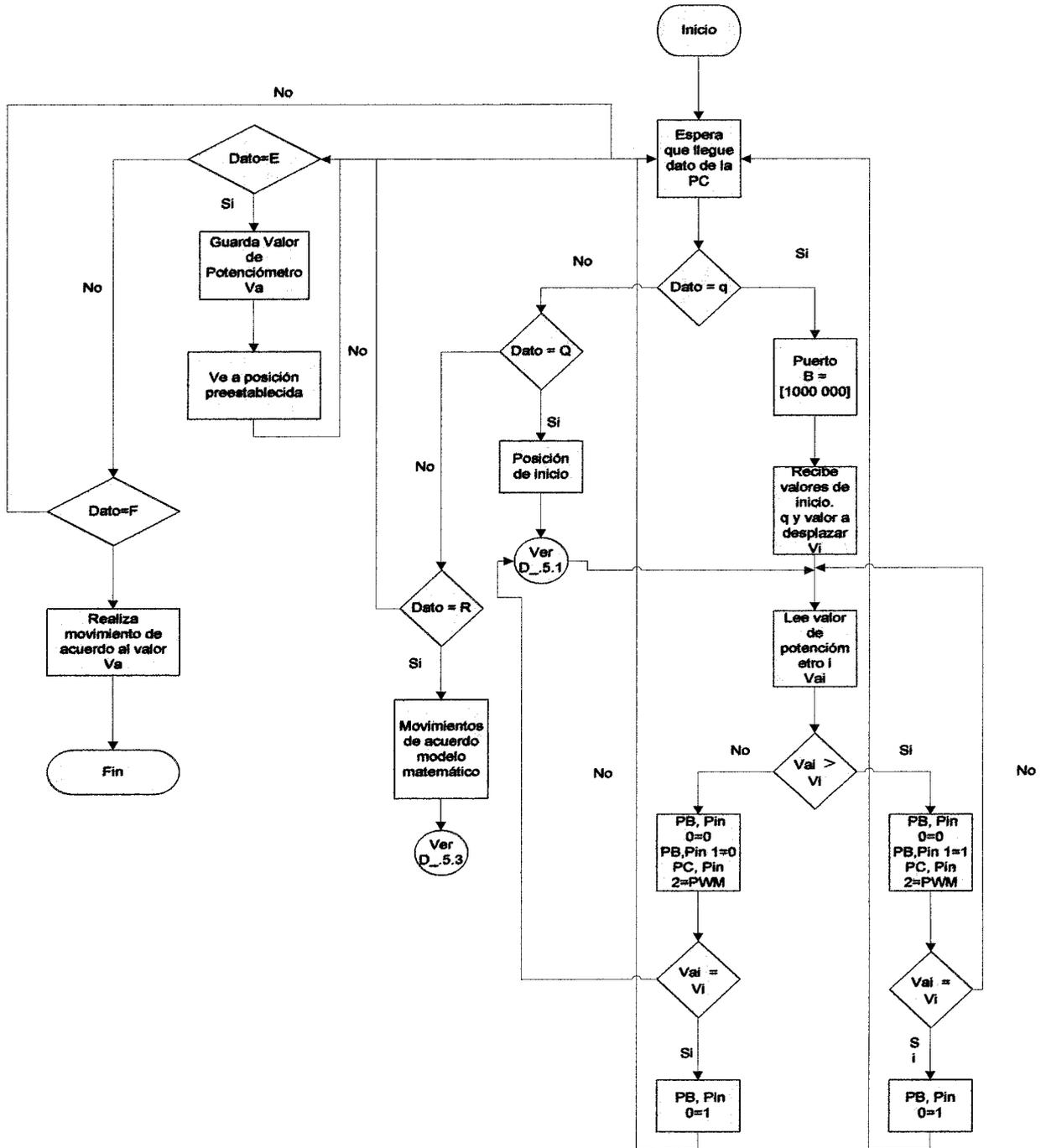
El Programa en Visual Basic sólo debe de mandar una letra "Q", para que los microcontroladores la interpreten como posición de inicio. Y después debe de mandar los valores de cada articulación para que cada microcontrolador tome el valor respectivo y comience a mover a los motorreductores que se encargaran de llegar a la posición deseada.

Diagrama de flujo D\_5.1 Posición de inicio de los eslabones.



Para realizar la simulación de taladrado se realiza la siguiente secuencia. Cuando le llega una letra "q", el microcontrolador realiza la operación que tiene programada. Para la programación se utiliza el siguiente diagrama de flujo.

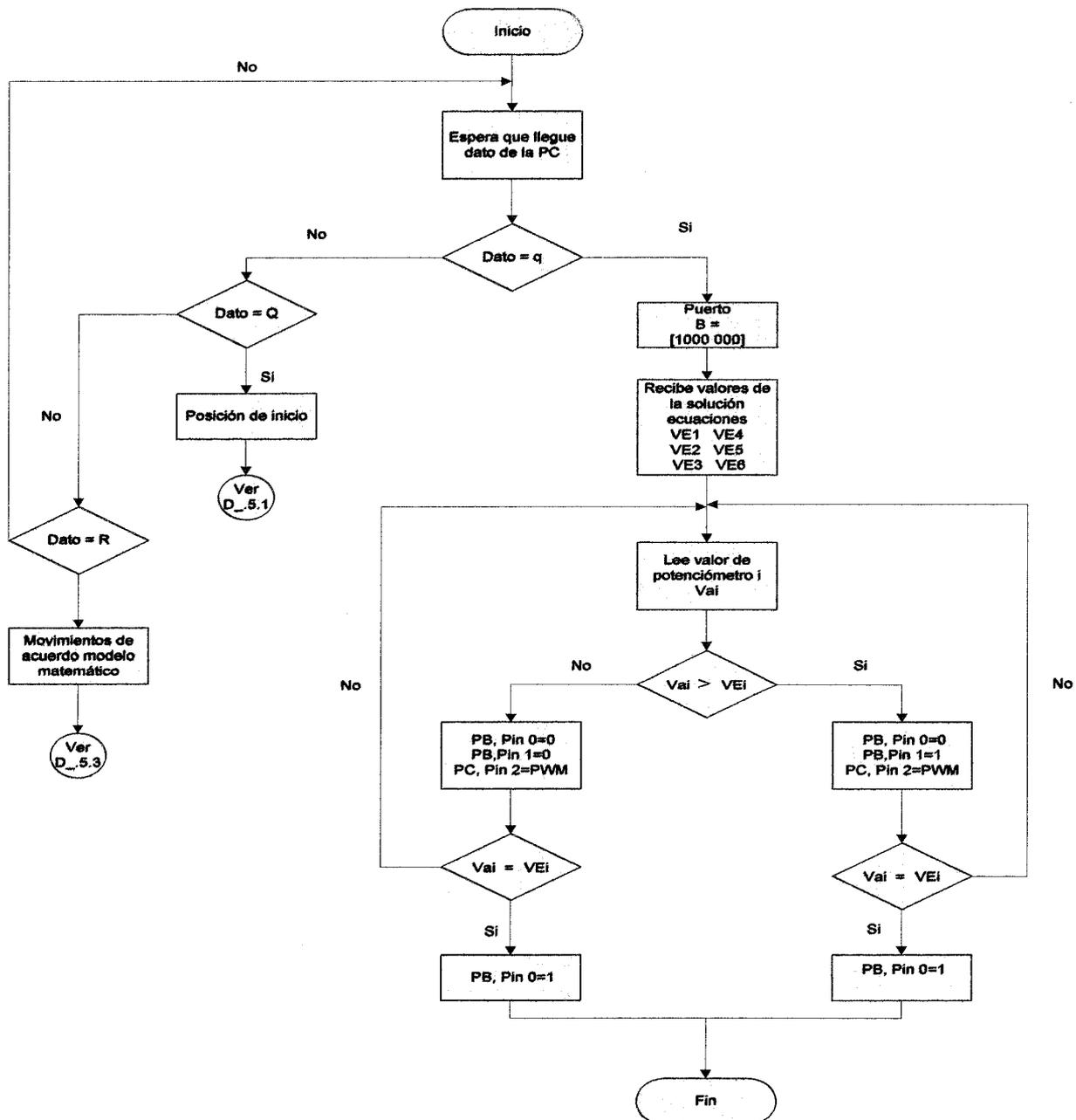
Diagrama de flujo D\_5.2



Para realizar el movimiento de forma automática, con sólo darle las posiciones en coordenadas cartesianas, el programa en Visual Basic se encarga de realizar las operaciones necesarias, para posteriormente sólo mandar los valores en caracteres ASCII. Con lo cual el microcontrolador al recibir dichos valores seguirá su rutina de trabajo.

Diagrama de flujo D\_5.3

Posición por medio de coordenadas cartesianas.



El programa fue codificado de acuerdo con los diagramas de flujo D\_5.1 al D\_5.3, en Visual Basic y en lenguaje C, para el caso del microcontrolador. El programa para el caso de Visual Basic se probó en Windows XP. La codificación de dicho programa se puede observar en el apéndice D,

---

<sup>1</sup> AGMA, Geometry Factors for Determining the pitting Resistance and Bending Strength of Spur, Helical, and Herringbone Gear Teeth ANSI/AGMA standard 908Manufactures Association.

# Capítulo 6.

## Construcción.

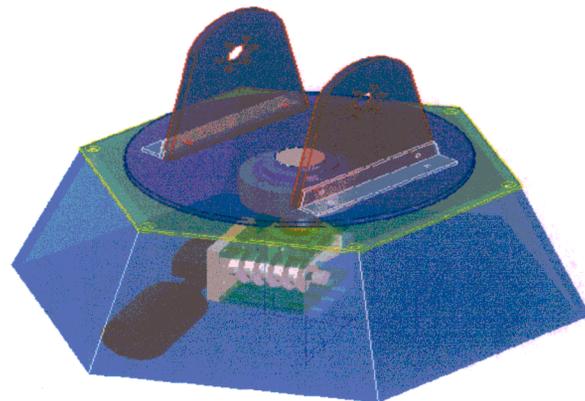
En este capítulo muestran los diagramas en explosivo de las diferentes piezas que componen al manipulador robótico, con lo cual es posible apreciar como está conformada la estructura del manipulador robótico. Así como también se describen las tareas que deberá de realizar el manipulador robótico.

### 6.1 Descripción de las piezas utilizadas.

La manufactura del manipulador robótico de 6GDL, se realizó en máquinas convencionales (fresadora, torno, taladro). Los planos de fabricación se muestran en el Apéndice A, los cuales fueron elaborados en Solid Edge. El manipulador robótico se divide en cuatro secciones, la base del manipulador robótico, el eslabón primario, el eslabón secundario y el efector final.

#### 6.1.1 Base del manipulador robótico

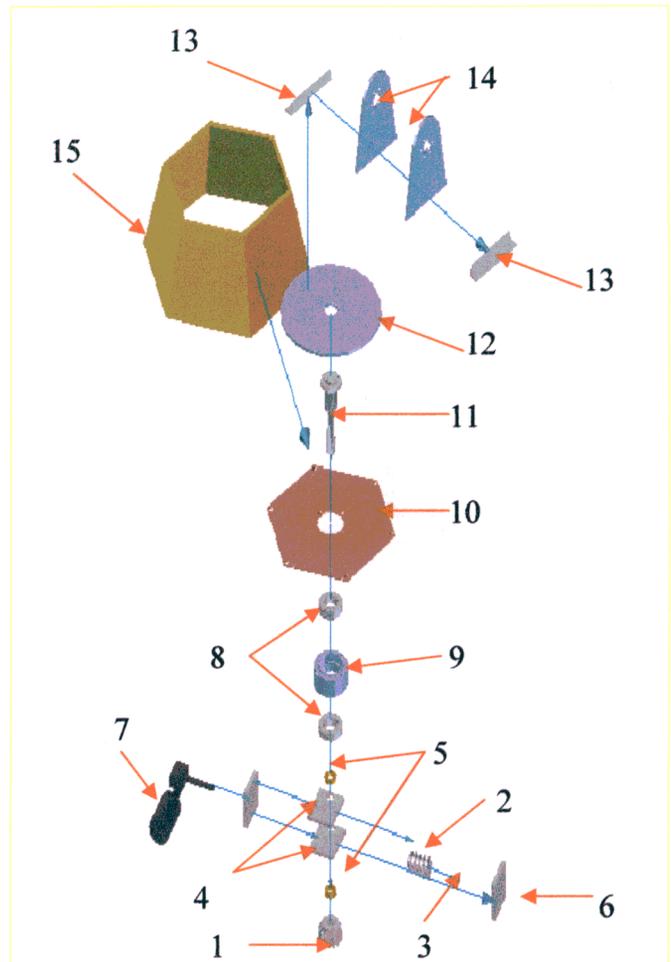
Como puede observarse la base soporte (No.15) ver figura 6.2 del manipulador robótico se diseño de está forma debido a que el motor al quedar acoplado a la caja de transmisión ocupa un espacio de 16 cm. de radio, y debido a que el manipulador robótico tendrá que soportar aproximadamente 10Kg, la base se propuso que fuera rígida para evitar vibraciones. En la figura 6.1 se puede apreciar el ensamble completo de la base del manipulador robótico. Está articulación proporciona el primer grado de libertad del manipulador robótico.



**Figura 6.1** Base del manipulador robótico.

El engrane de sinfín cuenta con una caja de transmisión definida por las piezas 4, 6, estas se ensamblan por medio de tornillos milimétricos. Se ensambla la flecha del motor (No.7), con el tornillo de sinfín (No.2). En la tapa lateral (No.6) se inserta un rodamiento, que va unido al final de la flecha del motor esto con el fin de disminuir la fricción que produce la flecha del motor al girar.

Las tapas superior e inferior (No.4) traen un barreno en el cual se inserta un buje de latón (No.5). Se inserta la flecha base (No.11) de la parte inferior delgada. Los bujes son de latón con el fin de evitar el desgaste por fricción que produce la flecha al girar. En medio de las tapas superior e inferior (No.4) se introduce el engrane de sinfín (No.1) que va acoplado a la flecha base en la parte delgada. En el soporte de rodamientos (No.9) se insertan los rodamientos (No.8), los cuales embonan en la parte gruesa de la flecha base (No.11).



- |                              |                            |
|------------------------------|----------------------------|
| 1. Engrane de sinfín.        | 9. Soporte de rodamientos. |
| 2. Tornillo de sinfín.       | 10. Base hexagonal.        |
| 3. Rodamiento.               | 11. Flecha base.           |
| 4. Tapa superior e inferior. | 12. Base circular.         |
| 5. Bujes de latón.           | 13. Angulo soporte.        |
| 6. Tapa lateral.             | 14. Soporte de eslabones.  |
| 7. Motorreductor.            | 15. Base soporte.          |

**Figura 6.2** Explosivo de la base del manipulador robótico

El soporte de rodamientos se fija en base hexagonal por medio de cuatro tornillos cabeza avellanada. La flecha base en su parte superior viene escalonada con el fin de insertar la base circular (No.12) que va unida con dos tornillos. En la parte superior de la base soporte (No.15) se coloca la base hexagonal, la cual se une con seis tornillos y sobre la cual se fija. Sobre la base circular (No.12) se fijan dos ángulos (No.13) de forma paralela a una distancia de 160[mm.] entre cada uno por medio de dos tornillos los cuales sirven para fijar los soportes de eslabón (No.14)

### 6.1.2 Eslabón primario.

En la figura 6.3 se observa el eslabón primario. Esta articulación proporciona el segundo grado de libertad. En la figura 6.4 se muestran cada una de las piezas que componen a esta parte. Las cajas de transmisión todas se ensamblan de la misma forma, sólo varían las dimensiones entre estas.

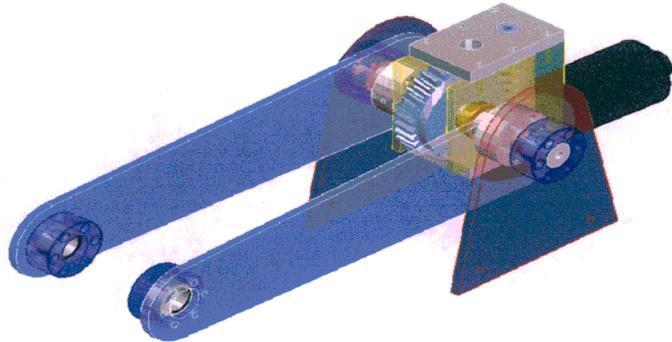


Figura 6.3 Ensamble del eslabón primario.

Al igual que en la base del manipulador robótico. Se tiene una transmisión de engrane de sinfín, la cual está formada por las piezas 16, -20, los bujes de latón tienen las mismas dimensiones de los anteriores.

En el soporte Bal G (No.23), se inserta el balero YB-88, en el cual girará la flecha G (No.21) evitando así que la fricción pudiera frenar a la flecha, la cual estará acoplada al eslabón G (No.24) por medio del soporte G, y de pernos. Que con ayuda del motor y de la caja de transmisión se podrá realizar el desplazamiento angular para esta articulación.

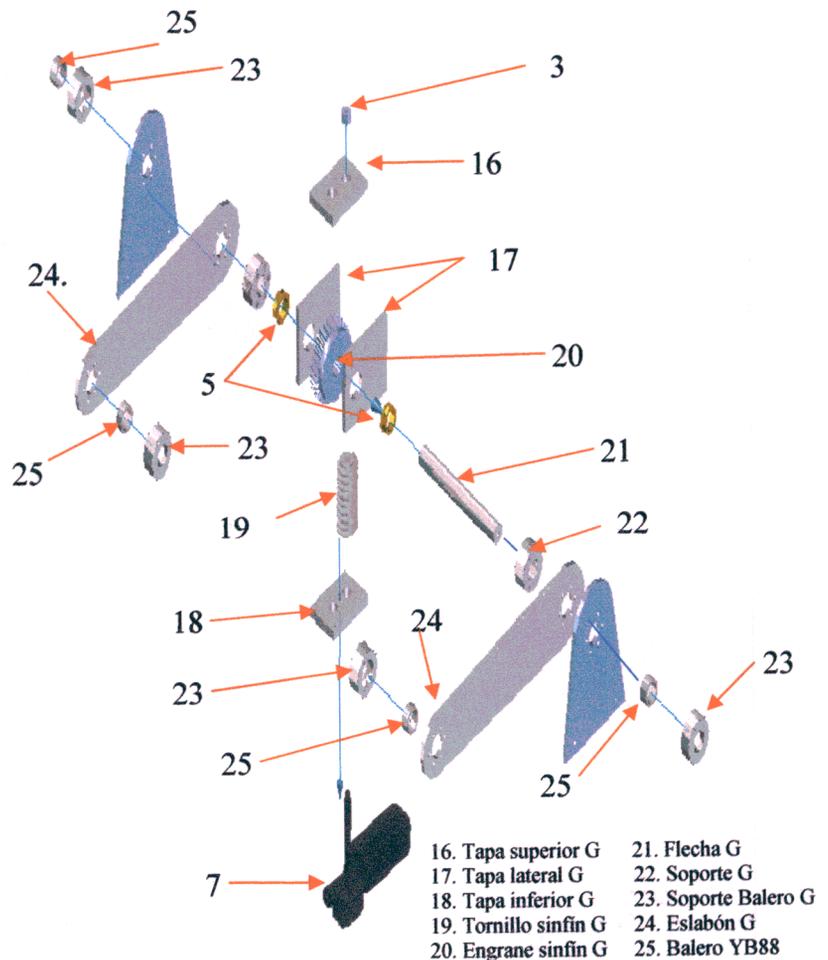


Figura 6.4 Explosivo del eslabón primario

### 6.1.3 Eslabón secundario.

Esta articulación proporciona el tercer grado de libertad. Con los cuales es posible posicionar al manipulador robótico en cualquier punto. En la figura 6.5 se muestra la tercera parte del manipulador robótico. La caja de transmisión es mas pequeña pero con las mismas características que las dos anteriores. En la figura 6.6 se muestran cada una de las piezas que compone al sistema.

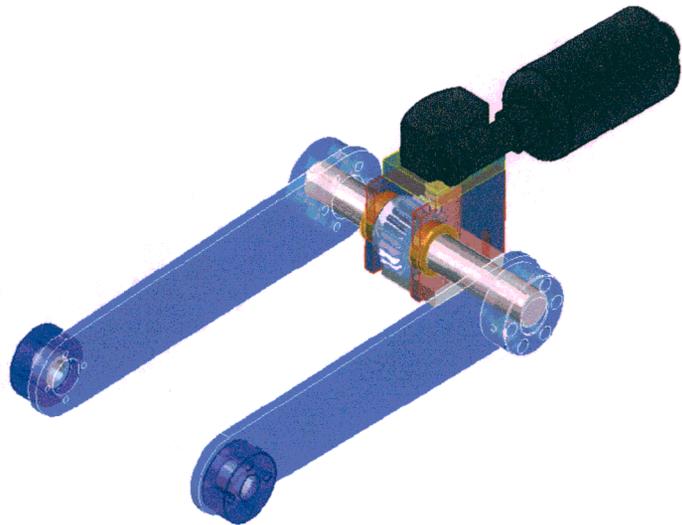


Figura 6.5 Ensamble del eslabón Secundario.

Como se observa en el diagrama en Explosivo figura 6.6, son semejantes los ensambles de cada articulación junto con los eslabones.

Con estos tres ensambles es posible posicionar al manipulador robótico en cualquier punto siempre y cuando este a su alcance. Y con los últimos tres grados de libertad es posible orientar al efector final.

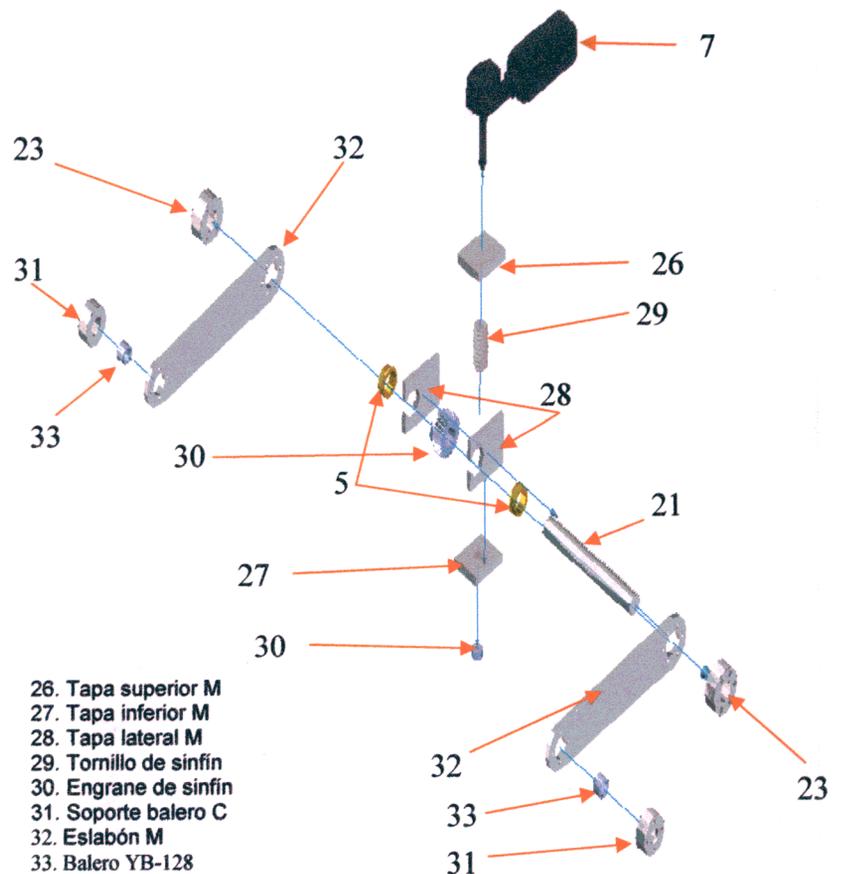
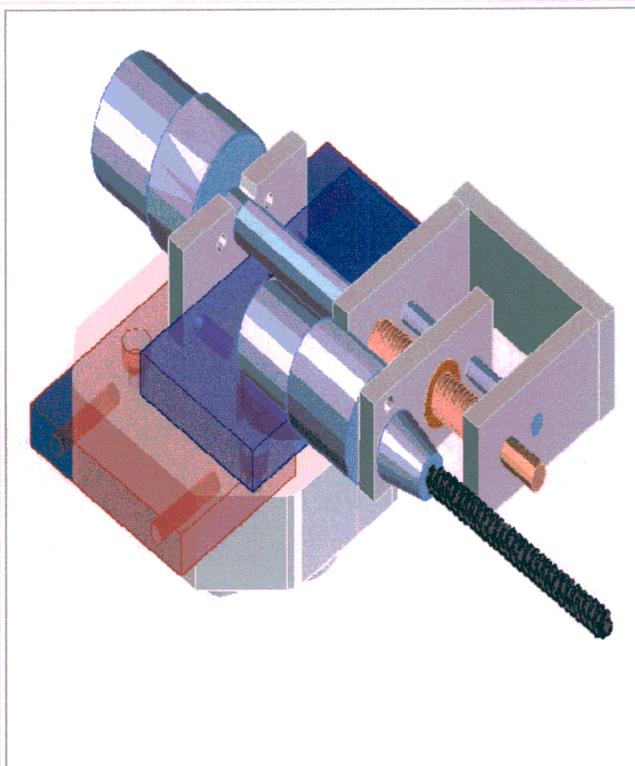


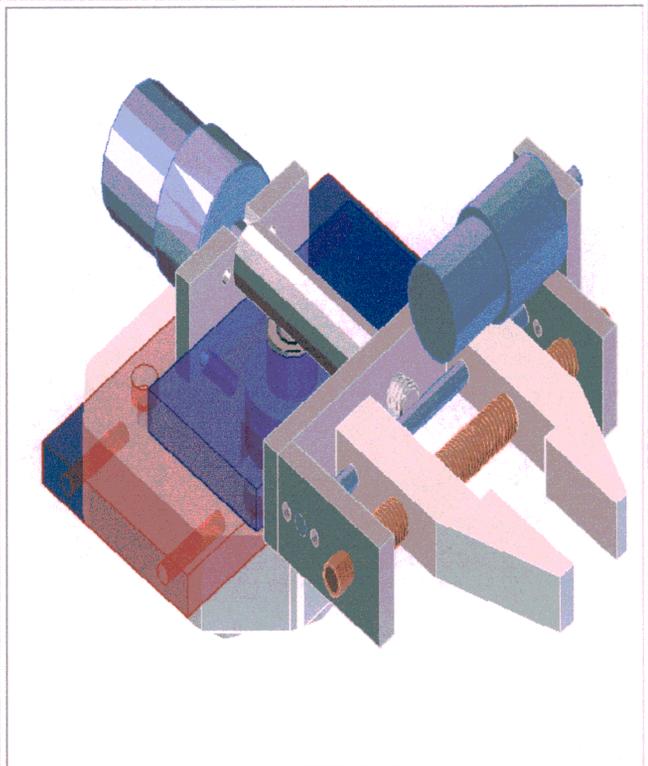
Figura 6.6 Explosivo del eslabón secundario.

#### 6.1.4 Efecto final.

El efecto final se compone de la pinza y la herramienta rotatoria. El sexto grado de libertad es utilizado como una junta rotacional cuando se utiliza la pinza, y como una articulación prismática cuando se utiliza la herramienta rotatoria. En la figura 6.7 y 6.8 se puede apreciar dichas configuraciones.



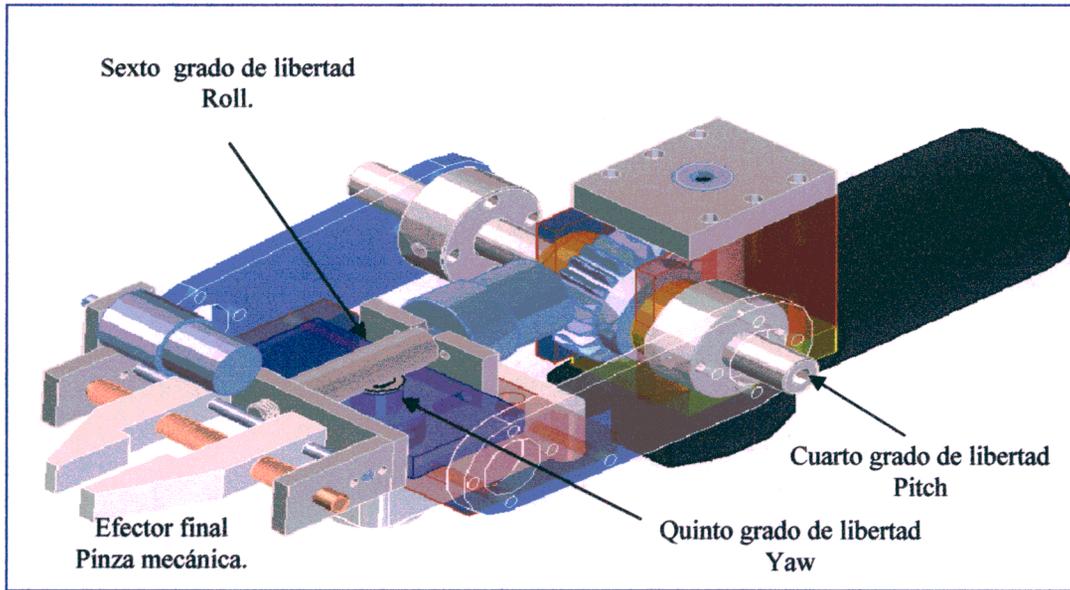
**Figura 6.7** Efecto final herramienta rotatoria con junta prismática.



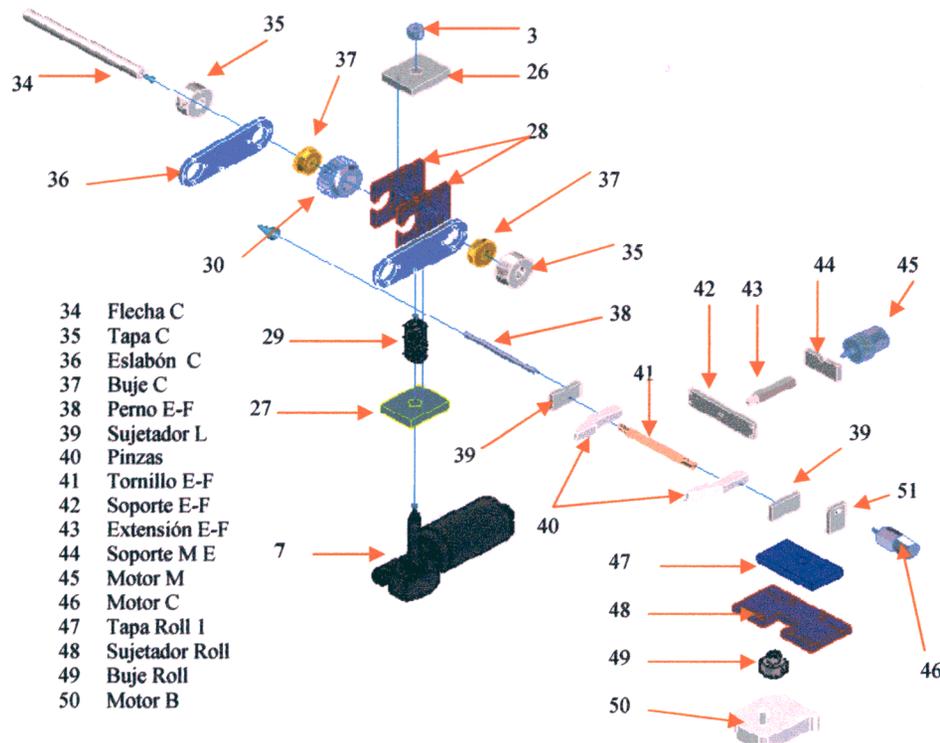
**Figura 6.8** Efecto final pinza con junta rotacional.

En la figura 6.9 se muestra a los tres últimos grados de libertad, que conforman al manipulador robótico de 6GDL. Y en la figura 6.10 se muestra el diagrama en explosivo donde se puede apreciar los componentes de la última parte que componen al manipulador robótico.

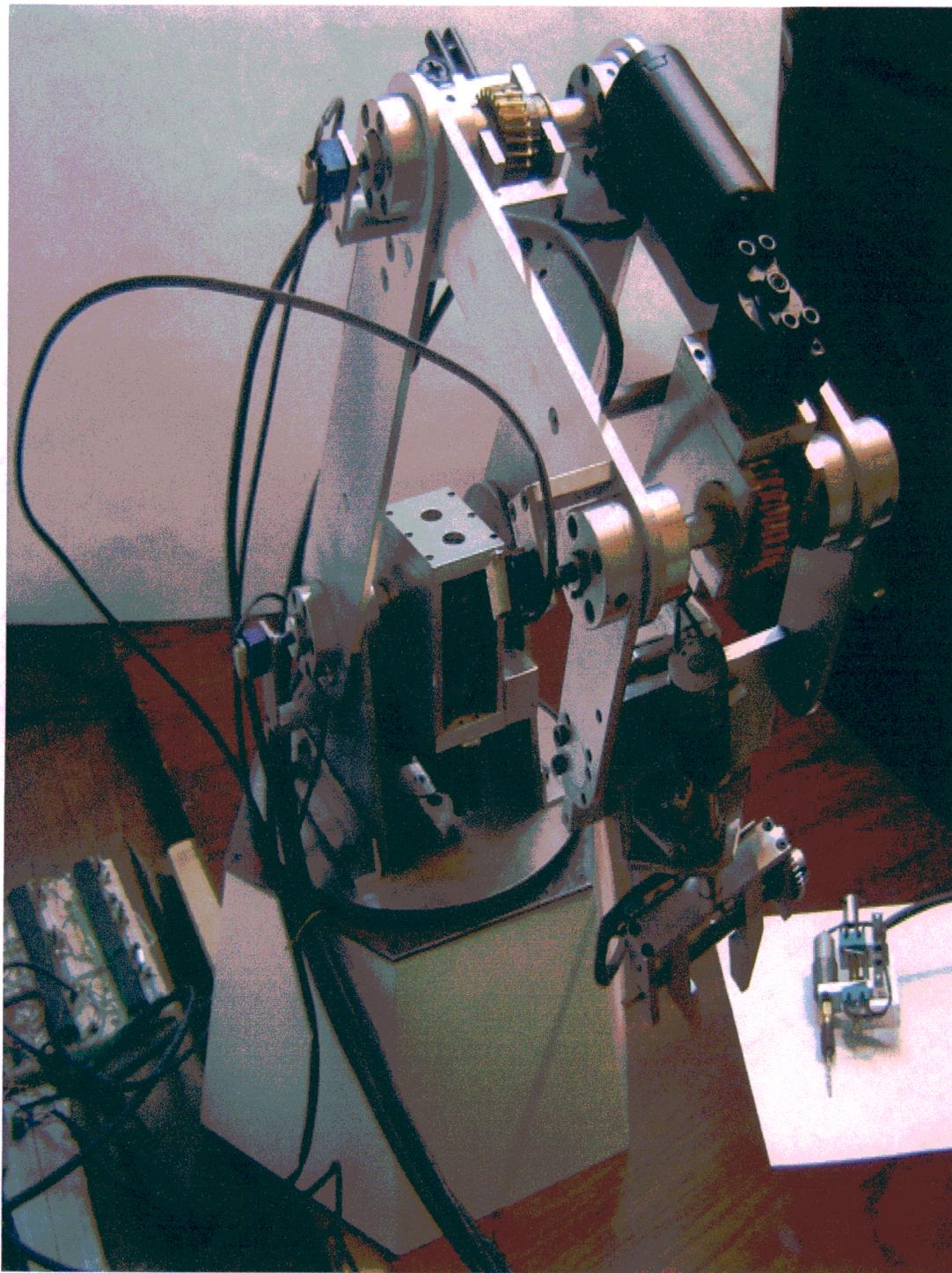
En el diagrama en explosivo se puede observar como se ensamblan las piezas que componen al sistema del efecto final del manipulador robótico.



**Figura 6.9** Ensamble del efector final.



**Figura 6.10** Diagrama en explosivo del efector final



**Figura 6.11** Fotografía del manipulador robótico de seis grados de libertad.

## 6.2 Descripción del manipulador robótico de 6GDL para la secuencia de una trayectoria.

Se programo al manipulador robótico para que llegue a una posición inicial y a una posición final, dichas posiciones están dadas en coordenadas cartesianas. Se realiza el cálculo apoyándose de las ecuaciones obtenidas en el capítulo 4, con lo cual se interpretan y se programa al manipulador robótico para que pueda llegar a dichos valores.

Se tiene las ecuaciones que determinan la posición de los primeros tres grados de libertad del manipulador robótico, con las cuales es posible posicionar al manipulador en cualquier punto en el plano XYZ. De las ecuaciones obtenidas en el capítulo 4, las ecuaciones 4.30, 4.41 y 4.42, fueron modificadas en vez de quedar en función de arco tangente quedaron en función arco coseno, con el fin de obtener de una forma mas real y segura las posiciones de las juntas rotacionales.

$$(\theta_1) = \arctan\left(\frac{Py}{Px}\right) \quad \text{Ecuación 6.1}$$

$$\theta_2 = \text{ArcCos}\left[\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\sqrt{(z-h)^2 + x^2 + y^2}}\right] - \text{ArcCos}\left[\frac{L1 + L2 * \text{Cos}[\theta_3]}{\sqrt{(L1 + L2 * \text{Cos}[\theta_3])^2 + (L1 * \text{Sin}[\theta_3])^2}}\right] \quad \text{Ecuación 6.2}$$

$$(\theta_3) = \text{ArcCos}\left(\frac{x^2 + y^2 + (z-h)^2 - L1^2 - L2^2}{2 * L1 * L2}\right) \quad \text{Ecuación 6.3}$$

Con estas ecuaciones es posible obtener cualquier ángulo con sólo establecer los valores de X, Y, y Z. Se propusieron algunos valores se resolvieron las ecuaciones en Matemática, se realizó un prototipo y se verificaron los valores de los ángulos obtenidos con lo cual se observo que los modelos matemáticos obtenidos son fiables.

Estas ecuaciones se programaron en Visual Basic, con el propósito de sólo darle las posiciones en coordenadas cartesianas iniciales finales con lo cual el manipulador robótico efectuara la operación que se le ordena.

### **6.3 Descripción del manipulador robótico de 6GDL para la simulación de taladrado.**

Se realiza una operación de taladrado, simulando un proceso industrial, en la cual el manipulador robótico tiene los valores preestablecidos de la trayectoria que debe de seguir para realizar dicha operación. Esto se lleva a cabo con sólo, presionar un botón del panel realizado en Visual Basic. Con lo cual se manda al manipulador robótico, la instrucción en código ASCII por medio de la PC, para que los microcontroladores realicen dicha operación y acciones a los actuadores.

Para realizar está operación el manipulador robótico, llegará a una posición preestablecida, cuando llegue e dicha posición el actuador utilizado en el sexto grado de libertad, funcionará como una junta prismática la cual permitirá que la herramienta rotaria se desplace verticalmente, con lo cual podrá realizar los barrenos.

### **6.4 Descripción del manipulador robótico de 6GDL para la programación por guiado.**

En está parte es posible llevar al manipulador robótico a cualquier posición, moviendo cada una de sus juntas rotacionales de forma independiente. Con está operación se pretende mostrar el funcionamiento de cada articulación del manipulador robótico.

La operación consiste en ir moviendo al manipulador robótico poco a poco Cuando se llega a la posición deseada se presiona la tecla guardar posición quedando guardada dicha posición, e inmediatamente después el manipulador robótico se va a su posición de inicio, esperando a que se presione la tecla realizar rutina, con lo cual el manipulador robótico repetirá la rutina que se guardo e ira a posición de inicio nuevamente.

## Resultados y conclusiones.

Los resultados obtenidos durante la elaboración de este trabajo de tesis denominado manipulador robótico de seis grados de libertad configuración antropomórfica, son la construcción del prototipo, la elaboración de la tarjeta de control que contiene seis microcontroladores, la selección de los sensores y de las etapas de potencia adecuadas para el funcionamiento del mismo, la realización del programa para el microcontrolador como para el panel visual, la obtención de los modelos cinemáticos de dicho robot, y finalmente la prueba de funcionamiento del manipulador robótico, con el seguimiento de una trayectoria, la simulación de taladrado de piezas pequeñas y la programación por guiado.

Se realizó un panel en Visual Basic, en el cual se muestra un dibujo del manipulador robótico y como efector final se visualiza a la pinza mecánica. En éste panel se incluyen todos los botones que accionan al manipulador robótico para que pueda realizar las operaciones que tiene programadas. En la figura 6.11 se muestra de cómo es que ésta conformado el panel visual.

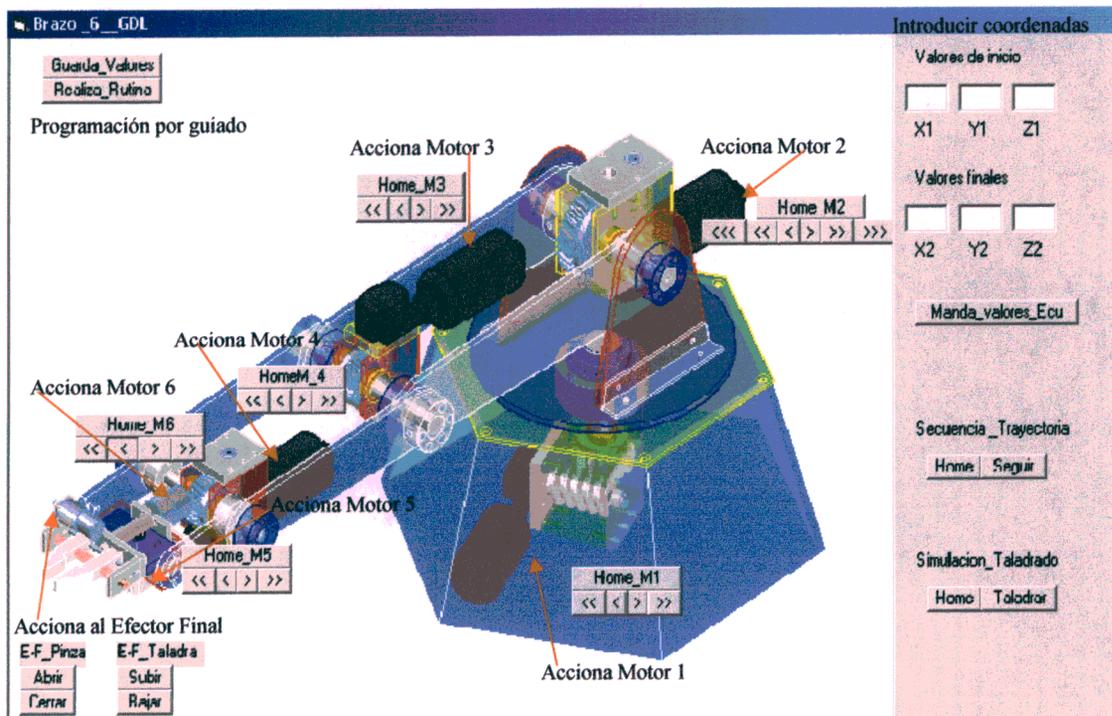
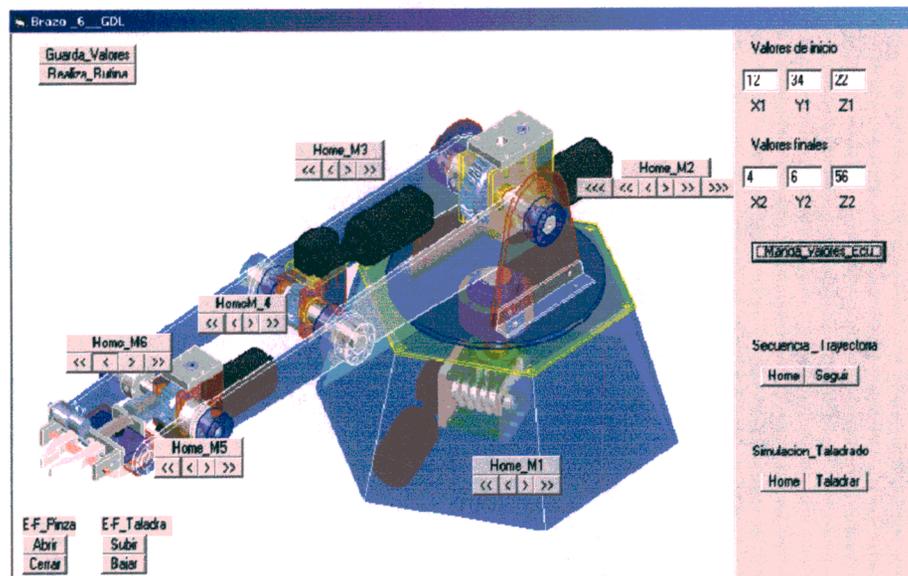


Figura 6.11 Pantalla para accionar al manipulador robótico.

### 6.5 Resultados del seguimiento de una trayectoria.

Dentro de la pantalla que acciona al manipulador robótico. En primer lugar se oprime el botón *Home* el cual se encuentra por debajo de la etiqueta *Secuencia\_Trayectoria*, para que el robot busque su posición de inicio, este botón de *Home* se debe de presionar siempre y cuando el efector final sea la pinza mecánica.

Posteriormente se pueden introducir tres valores iniciales en coordenadas cartesianas debajo de la etiqueta *Valores de inicio* y tres valores finales debajo de la etiqueta *Valores finales*, como se muestra a continuación:



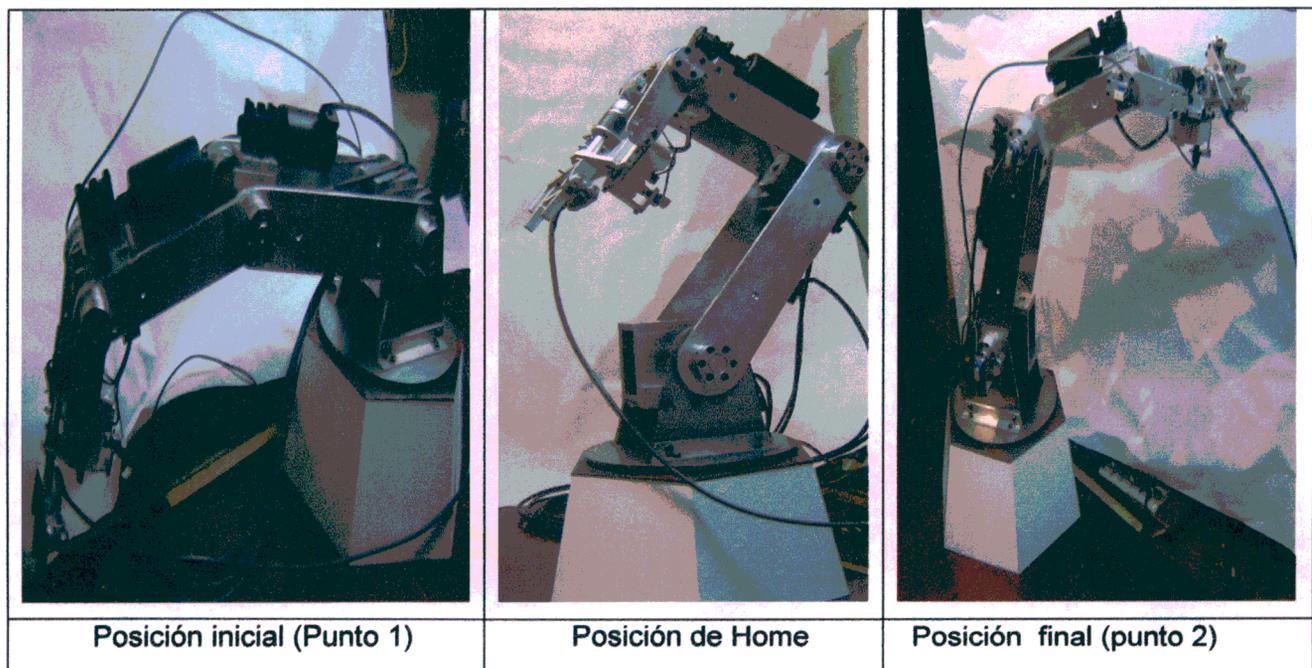
**Figura 6.12** Pantalla para accionar al manipulador robótico.

Visual Basic realiza las operaciones necesarias para obtener los valores de los ángulos de las tres primeras articulaciones, a partir de las coordenadas cartesianas propuestas, por medio de las ecuaciones 6.1, 6.2 y 6.3 del capítulo 6. Posteriormente se oprime el botón *Mandar\_valores\_Ecu* con lo cual se mandan los valores a la tarjeta de control de microcontroladores para que realice dicha operación.

Hay que mencionar que Visual Basic no es una herramienta que resulte eficaz para realizar este tipo de operaciones, debido a que al implementar las ecuaciones 6.2 y 6.3 en Visual Basic, se tuvieron que utilizar ecuaciones derivadas para poder realizar el cálculo del arco coseno.

Lo que ocasionó que para algunos puntos el sistema quedara indeterminado. Se optó por resolver por separado dos puntos dados P1 (6, 65, 4) y P2 (34, 35, 69). Con la ayuda del software Matemática se obtienen los valores de los ángulos de las primeras tres articulaciones que nos sirven para posicionar al manipulador robótico en cualquier punto en el espacio dentro de su rango de operación, estos valores se guardan en el microcontrolador para que los tenga como preestablecidos. Para iniciar la rutina sólo se debe de presionar el botón *Seguir*, se acciona al manipulador robótico para que llegue a la posición inicial y final.

Para la orientación del efector final se proponen los valores angulares que deben de tener las tres articulaciones restantes, debido que para este caso no influyen de manera considerable.



**Figura 6.13** Fotos del manipulador, seguimiento de una trayectoria.

### 6.6 Resultados de la simulación de taladrado.

Dentro de la pantalla que acciona al manipulador robótico. En primer lugar se oprime el botón *Home* el cual se encuentra por debajo de la etiqueta *Simulación \_ Taladrado*, para que el robot busque su posición de inicio (ver figura 6.11), éste botón de *Home* se debe de presionar siempre y cuando el efector final sea la herramienta rotatoria. Para cambiar al efector final solo hay que aflojar dos tornillos y un opresor como se muestra en la figura 6.14.

Para iniciar con la simulación de taladrado se debe de presionar el botón *Taladrar* que se encuentra debajo de la etiqueta *Simulación \_ Taladrado* (ver figura 6.11), el manipulador robótico realizará dicha operación. Parte de la posición de home a la posición que tiene preestablecida como posición final, el manipulador llega a la posición final, a través de los potenciómetros lineales acoplados directamente en cada flecha de las articulaciones.

El manipulador robótico realiza la simulación de taladrado. El robot se coloca por encima de la pieza a taladrar, posteriormente el actuador seis se acciona y hace bajar al efector final que posee a la broca, para verificar si el efector final ya llego al limite de la parte inferior, lo hace a través de sensores de final de carrera, acoplados en la parte inferior para tener el control de este. Una vez que ha llegado al final, se activa el sensor lo cual manda una señal al microcontrolador para que el actuador gire en sentido contrario, y suba la herramienta rotatoria hasta llegar a accionar al sensor final de carrera superior. Dando por terminada la simulación.

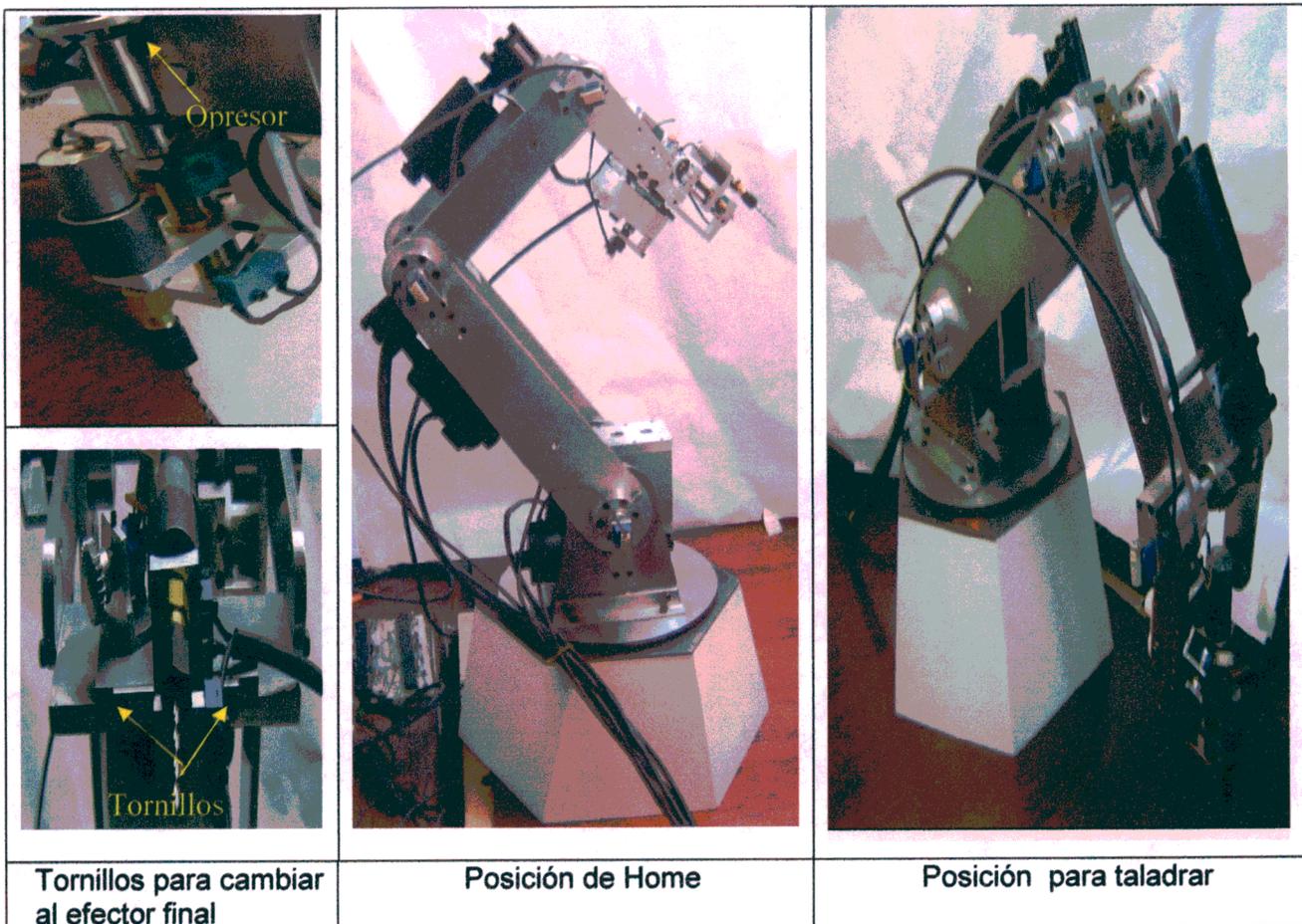


Figura 6.14 Fotos del manipulador, simulación de taladrado.

### 6.7 Resultados de la programación por guiado.

Dentro de la pantalla que acciona al manipulador robótico, se observa un dibujo del robot, en el cual a su alrededor hay botones, los cuales sirven para accionar cada uno de los actuadores y mover de forma independiente cada articulación según se desee. Cada botón es independiente de los demás, cada botón de *Home*, sólo manda al actuador a una posición de home preestablecida.

La programación por guiado permite observar los movimientos del manipulador robótico. Con esta operación se aprecia que el manipulador robótico puede realizar movimientos uno a uno, para posicionarlo en un punto en específico, cuando se llega a este punto se presiona el botón *Guardar\_Valores* (ver figura 6.11), el cual manda la instrucción a la tarjeta de microcontroladores que guarde la posición de cada junta rotacional, esto se logra con sólo leer los valores de los potenciómetros lineales función que realiza la tarjeta de microcontroladores. Posteriormente el robot regresa a posición de home que esta preestablecida, y espera a que se presione el botón *Realizar\_Rutina*, una vez presionado este botón el robot regresa a la posición que se le indico con anterioridad.

### 6.8 Resultados de las especificaciones propuestas.

De las especificaciones que se dieron para la construcción del manipulador robótico se lograron satisfacer las siguientes:

**Tabla 6.1** Especificaciones del manipulador

<b>Especificaciones</b>	<b>Capacidad</b>
Grados de libertad 6	5 del tipo rotacional Y uno que puede ser prismático o rotacional.
Capacidad de carga de los tres primeros eslabones	3[Kg] máximo
Exactitud de punto	Entre 6 y 9 [mm]
Repetibilidad	7[mm]
Velocidad	Entre 4 y 5 [rpm].
Costo máximo de los componentes comerciales	\$ 14,000.00 M.N
Alcance	700 [mm]
Materiales	Aluminio. 6061 T6, Fundición gris, acero.

**6.9 Costos de materiales.**

Can.	Unidad	Descripción	Costo uni pesos	Costo t/u pesos
2	Piezas.	Fuentes de PC.	\$250 .00	\$ 500.00
30	Metros	Cable cal 20 color rojo condumex THW.	\$3.00	\$90.00
1	Lote	Tortillería y herramienta consumible.	\$500.00	\$500.00
6	Piezas	Microcontroladores.	\$100.00	\$600.00
1	Pieza	Max 233.	\$50.00	\$50.00
3	Piezas	Módulos de etapas de potencia para motores.	\$1,200.00	3600.00
6	Piezas	Potenciómetros lineales.	\$75.00	\$450.00
1	Pieza	Programador de memorias Pics (USB).	\$1,200.00	\$1,200.00
1	Pieza	Cable de comunicación serial-usb.	\$280.00	\$280.00
30	Piezas	Cinturones de nylon de 15 cm.	\$0.50	\$15.00
4	Piezas	Microswitch	\$10.00	\$40.00
4	Piezas	Motores de CD, de 240[Watts].	\$3,50.00	\$1400.00
2	Piezas	Motores de cd. De 72[Watts].	\$300.00	\$600.00
				\$300.00
2	Piezas	Motores de Cd de 100[Watts].	\$150.00	
1	Lote	Placa de aluminio de 1/8" x 16" x 36"	\$300.00	\$300.00
1	Lote	Tarjeta de circuito impreso para microcontroladores	\$600.00	\$600.00
1	Lote	Tortillería	\$120.00	\$120.00
1	Lote	Componentes electrónicos.	\$300.00	\$300.00

**Total de material. \$10,945.00 Pesos**

**Materiales de fabricación de robot**

Cant.	Unidad	Descripción	Costo uni Pesos	Costo t/u Pesos
1	Lote	Flecha de aluminio	\$300.00	\$300.00
1	Lote	Bronce	\$200.00	\$200.00
1	Lote	Placa de aluminio	\$240.00	\$240.00
1	Lote	Rodamientos	\$500.00	\$500.00
1	Lote	Placa de acero rectificada	\$750.00	\$750.00
1	Lote	Latón	\$150.00	\$150.00
1	Pieza	Base de fundición hierro gris	\$350.00	\$350.00

**Total de material. \$2,490.00 Pesos**

Total 1 \$ 10,945.00

Total 2 \$ 2,490.00

**Monto total \$ 13,435.0**

#### **6.10 Resultados obtenidos en la elaboración de este trabajo.**

Con éste trabajo de tesis fue posible realizar la construcción del manipulador robótico con componentes de bajo costo y lograr mover cada articulación por medio de una PC, logrando cubrir los objetivos planteados en su mayoría.

Se propuso una metodología para la construcción del prototipo la cual consistió en conocer las diferentes aplicaciones que han tenido los robots desde su inicio, reforzando así la propuesta de construir un manipulador antropomórfico con seis grados de libertad, debido a que estos manipuladores tienen mayor aplicación en la industria.

Una vez definida la configuración y los grados de libertad se selecciono el material adecuado para la construcción del mismo, proponiendo un diseño conceptual con lo cual fue posible proponer los componentes que el manipulador robótico utiliza para su funcionamiento. Tales fueron componentes mecánicos como eléctricos y electrónicos tales como transmisiones, sensores, actuadores.

Se resolvió la cinemática directa e inversa para obtener las ecuaciones que describen posición de los primeros tres grados de libertad, con lo cual se obtienen los modelos matemáticos necesarios para posicionar el manipulador robótico en cualquier punto sobre el plano "XYZ".

Se realizó el diseño a detalle de las piezas que componen al manipulador robótico, así como las fuerzas que se producen en el manipulador robótico. Se diseño una tarjeta de control que contiene a los microcontroladores los cuales tienen como tarea recibir las instrucciones de la PC, para activara cada actuador del manipulador robótico así como la selección de las etapas de potencia que accionan a cada motor, para lograr mover a los actuadores y tomar las lecturas de los sensores. Se realizó el programa en Visual Basic, como en el microcontrolador para que estos se pudieran comunicarse entre si.

Una vez que se tuvieron claros los puntos que componen al manipulador robótico se partió a la etapa de la construcción del prototipo, tanto en la parte electrónica, como en la mecánica y en la programación. Llevando a la realidad las ideas y propuestas plasmadas para le elaboración de éste mecanismo funcional.

Hay que señalar que no existe una metodología concreta para la construcción de éste tipo de mecanismo por lo que en éste trabajo de tesis se propuso resolverlo por éste método. Con lo cual se lograron cubrir los siguientes objetivos específicos:

- Las transmisiones trabajan sin ningún problema, por lo que las seleccionadas fueron las indicadas.

Las transmisiones de sinfín corona logran dar el par necesario para levantar la carga propuesta, y como se puede apreciar en el capítulo 5, se pueden levantar una carga mayor que la propuesta el inconveniente en éste caso es que al aplicar una carga mayor a 5[Kg], el mecanismo tiende a sufrir una flexión en la unión de las juntas rotacionales, con lo cual se obtiene una inestabilidad para la posición de cada eslabón.

- Los actuadores seleccionados suministran la potencia necesaria para cada eslabón.

Los actuadores adquiridos soportan la carga de trabajo a los que son sometidos, suministrando la potencia necesaria, y no teniendo ningún problema de calentamiento excesivo o de pérdida de fuerza. Hay que señalar que están trabajando a la mitad de su capacidad, ya que pueden soportar un voltaje máximo de 24[V], y 10[A], lo cual da una potencia de 240[watts], para éste trabajo de tesis se pusieron a trabajar a 12[V].

- Las etapas de potencia logran cubrir las necesidades de los motores.
- El Diseño de la tarjeta de control la cual permita establecer una comunicación entre el manipulador robótico y la PC.

En el diseño y construcción de la tarjeta de control de los microcontroladores se utiliza la comunicación serial para poder mandar las instrucciones de la PC al microcontrolador, hay que señalar que se utilizo un microcontrolador para cada uno de los actuadores, debido a que la señal de PWM y la lectura de los potenciómetros tienen que ser constantes. El único inconveniente de la tarjeta de control es que hay que esperar a que el manipulador termine de realizar la operación que este realizando en ese momento para poder enviarle la siguiente instrucción, de lo contrario se bloquea el sistema. Por lo que habrá que resetear a la esta tarjeta.

Se observó que si se manejaban dos motores y dos sensores con un microcontrolador la velocidad de respuesta de éste se llegaba a perder ocasionado que el manipulador robótico perdiera la lectura de uno de estos y se perdiera el control.

- Los sensores utilizados fueron potenciómetros lineales y finales de carrera.

Los potenciómetros lineales, y los finales de carrera trabajan de forma adecuada, se tienen un error de exactitud de entre 7 y 9[mm], esto es debido a la inercia y el juego que presentan las uniones del manipulador robótico, pero en ocasiones también influye el tiempo que tarda el potenciómetro de estabilizarse para llegar al valor requerido.

- Se obtuvieron los modelos matemáticos de la cinemática directa e inversa.

Las ecuaciones obtenidas representan el modelo matemático de las posiciones en forma teórica y llevadas a la práctica se aprecia que efectivamente describen los valores de las variables articulares de los puntos que se desea que el manipulador robótico alcance.

- Realización de un programa visual en una PC, que permita al usuario dar instrucciones al manipulador robótico.

Visual Basic en éste caso no fue la mejor opción para poder interpretar las ecuaciones obtenidas de la cinemática directa e inversa, debido a que no posee una buena base para resolver funciones trigonométricas inversas, ocasionando que al utilizar ecuaciones derivadas se obtienen puntos indeterminados para algunos valores y ocasionado que el manipulador robótico no pudiera realizar determinadas funciones.

- Construcción del manipulador robótico de seis grados de libertad de configuración antropomórfica.

En la construcción se tuvieron que modificar algunas piezas y adicionar otras más para poder lograr el funcionamiento de éste, pero en general fueron mínimos los cambios así como la fabricación de más de una vez algunas piezas.

## 6.11 Conclusiones.

A través del presente trabajo de tesis se cumplieron los siguientes objetivos:

Se realizó la construcción del manipulador robótico de seis grados de libertad configuración antropomórfica, se utilizó aluminio 6061 T6, para la elaboración en su mayoría del prototipo, siendo un material ligero y resistente el cual resulto ser adecuado para este trabajo. Las transmisiones de engrane de sinfín resultaron ser funcionales y eficientes, los rodamientos seleccionados, el calculo de las flechas fueron los adecuados debido a que no se presentan problemas por fricción o que las flechas se flexionen.

Los costos de los componentes del manipulador robótico no rebasan el presupuesto propuesto, por lo que es posible construir un robot de seis grados de libertad con programación de movimientos desde una PC, el cual puede ser aplicado en actividades de docencia, pero no en una aplicación industrial.

Se logro probar el funcionamiento del manipulador robótico, al mover a cada una de las articulaciones del manipulador por medio de la programación por guiado, por el seguimiento de una trayectoria, y por la simulación del proceso de taladrado. No se pudo realizar la operación de darle los puntos iniciales y finales en coordenadas cartesianas, al manipulador robótico, pero éste problema se puede resolver programando directamente a los microcontroladores con las ecuaciones respectivas.

En la parte electrónica se diseño la tarjeta de control, que contiene principalmente a seis microcontroladores, de la cual se realizo su circuito impreso, esta tarjeta trabaja sin ningún problema, no se presentan problemas de fallas de comunicación o de cortos, la respuesta entre los datos que manda la PC a la tarjeta es rápida, un inconveniente es que no se pueden mandar datos secuencialmente para realizar dos actividades de forma inmediata.

Las etapas de potencia adquiridas, trabajan de forma correcta, los motorreductores adquiridos cuentan con la potencia necesaria para mover a los eslabones, los potenciómetros lineales utilizados como encoders, para este trabajo de tesis no resultaron funcionar como se esperaba.

En la parte de programación se realizó la programación del microcontrolador en lenguaje C, debido a que es más flexible para programar. Visual Basic presentó la desventaja de no poder resolver funciones trigonométricas de forma directa. Pero en lo que respecta a lo demás se pudo realizar el panel visual, con el cual se logró entablar la comunicación entre la PC, y la tarjeta de microcontroladores.

Para actividades didácticas el manipulador robótico puede trabajar sin ningún problema pero para operaciones más delicadas es decir para procesos industriales es imprescindible utilizar componentes de mayor calidad, para poder realizar movimientos finos y de precisión, debido a que en ocasiones el sistema tiene un rango de error, éste rango de error es en la posición de los eslabones debido a los potenciómetros lineales y a la velocidad de lectura de los microcontroladores, además de intervenir los momentos de inercia de los mecanismos que componen al manipulador robótico.

**Recomendaciones de trabajos futuros.**

Es importante mencionar que para realizar trabajos con el manipulador robótico en la industria es necesario realizar el análisis detallado de la cinemática, en el cual hay que considerar los desplazamientos, velocidades y aceleraciones, debido a que para realizar operaciones como la de pintado o de soldadura hay que controlar perfectamente las velocidades y posiciones del brazo robótico, aun mas en la industria automotriz se realizan operaciones mas complicadas de las cuales se requiere un buen control del sistema.

De lo cual se pueden mencionar los siguientes temas como recomendaciones:

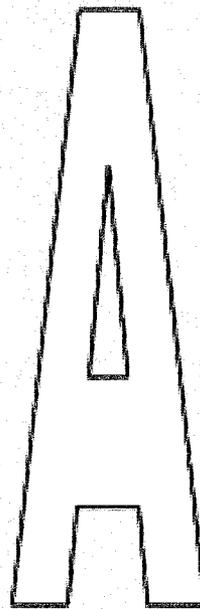
- Control de las articulaciones con interpolación entre estas.
- Realizar el análisis dinámico para velocidades angulares altas.
- Rediseño tomando en cuenta los puntos malos de este prototipo.

**Referencias bibliográficas.**

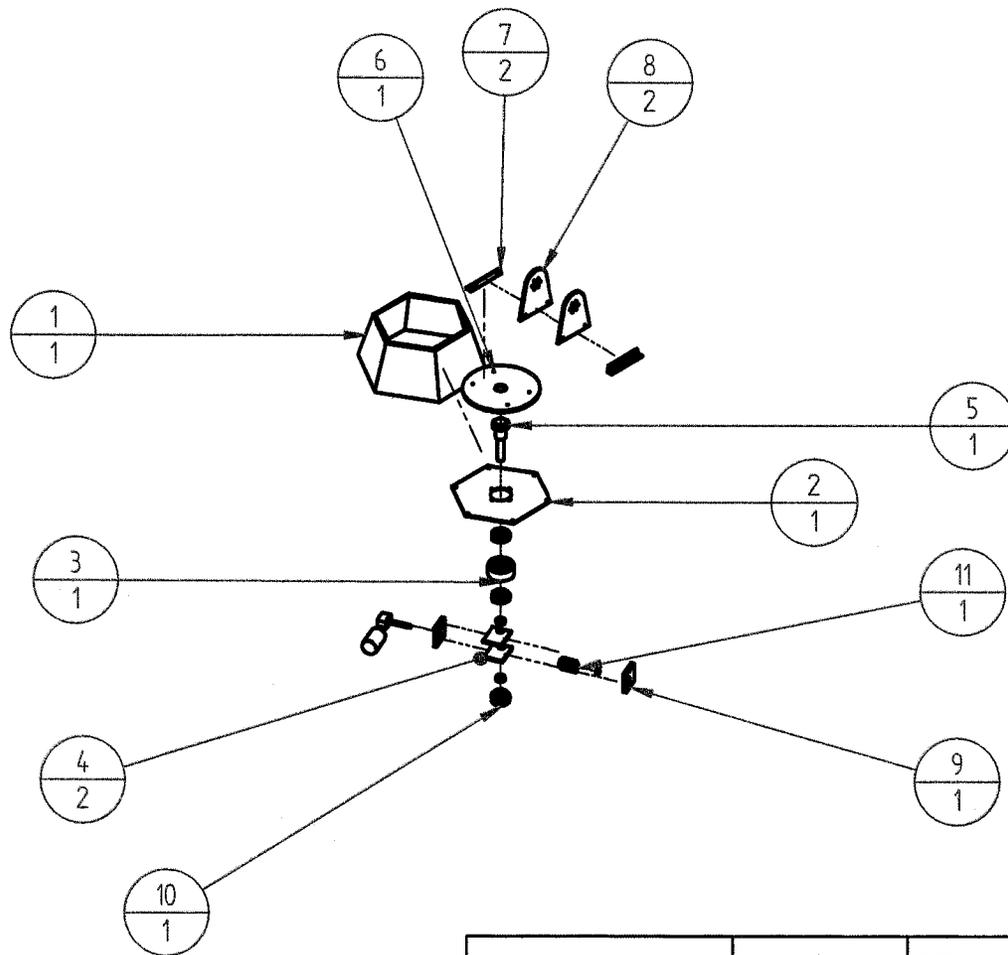
- [1] Robótica, manipuladores y robots móviles.  
Anibal Ollero Baturone, 2001.  
Editorial. Alfa Omega-Marcombo.
  
- [2] Robots industriales manipuladores.  
Rafael Iñigo Madrigal, Enric Vidal Idearte, 2001.  
Editorial. Alfa Omega, México.
  
- [3] Robótica práctica tecnología y aplicada.  
José Angulo Usategui, 1996.  
Editorial. Paraninfo, España.
  
- [4] Robótica.  
Craig John J. 200.  
Editorial. Pearson education, México.
  
- [5] Robótica, Control, Detección, Visión e inteligencia.  
K.S.FU, R. C. González, C.S.G. Lee.  
Editorial. Mc Graw Hill.
  
- [6] Sistemas de control para ingeniería.  
Norman S. Nise.  
Editorial. CECSA, 2005.
  
- [7] Diseño de máquinas.  
Robert L. Norton.  
Editorial. Pretende Hall, 1999
  
- [8] Mecánica de materiales.  
Fernanding P. Beer, E. Russell Johnston, Jr, John T. Dewolf.  
Editorial. Mc Graw Hill.

- [9] Resistencia de materiales  
Andrew Pytel, Ferdinand L. Singer.  
Editorial. Alfaomega.
- [10] Visual Basic 6, curso de programación.  
Francisco. Javier Ceballos Sierra.  
Editorial. Alfaomega.
- [11] Tesis "Modelación y prueba de secuencias de movimientos de un robot de dos grados de libertad para un problema de evasión de obstáculos en el plano "  
Facultad de Ingeniería. División de estudios de postgrado. UNAM.  
Autor: Ing. Ociel Flores Díaz.  
2003.
- [12] Tesis "Diseño mecánico de un brazo manipulador"  
Facultad de Ingeniería. UNAM.  
Autor: Sergio Francisco Carlos Esteves Rebollo.  
2004.
- [13] <http://www.kawasakirobot.com>
- [14] <http://www.motoman.com>

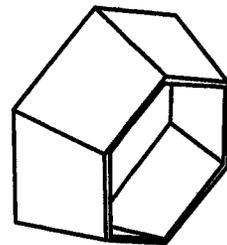
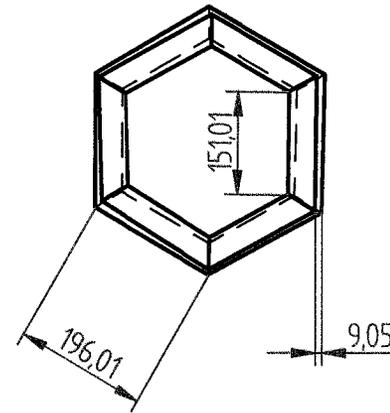
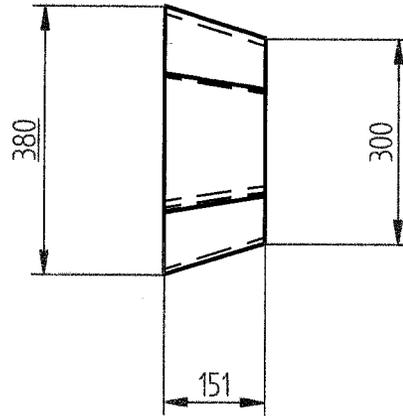
# APÉNDICE



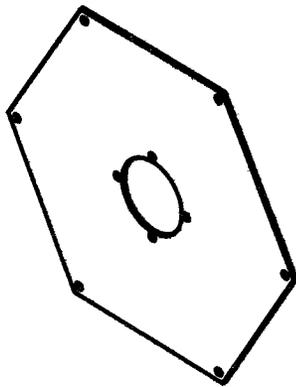
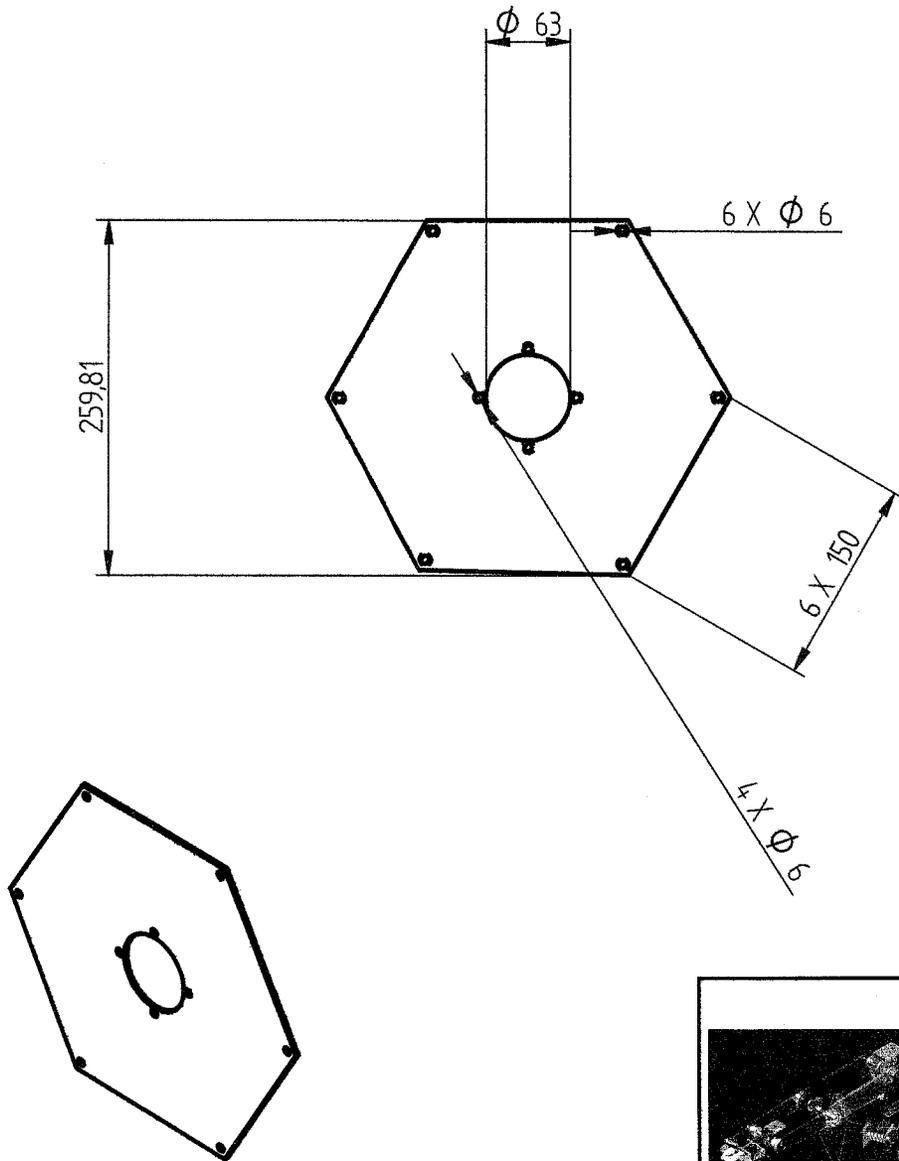
**Dibujos de los elementos mecánicos  
del manipulador robótico de 6GDL**

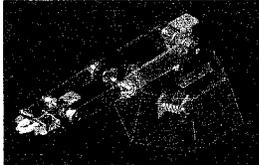


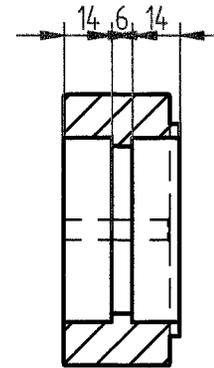
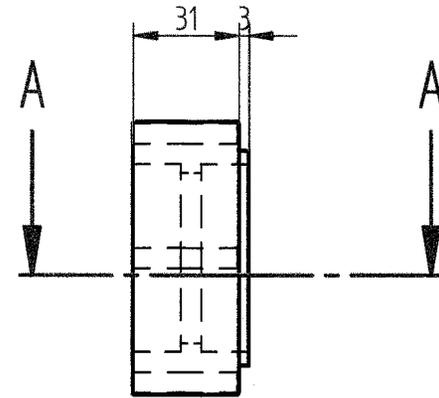
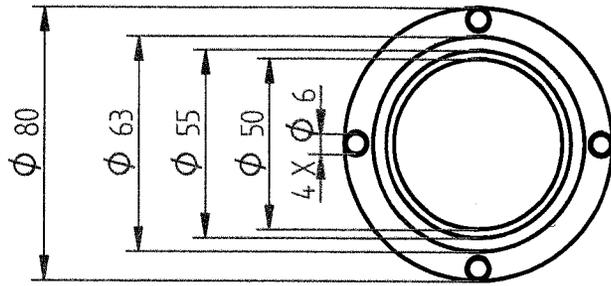
	UNAM- D.E.P.F.I	DIBUJO No.	ACOTACIÓN: mm	ESCALA: S/E
	DIBUJO: PATRICIO M.Z	FECHA 04/12/06	Plano Explosivo de la base	
	DIRECTOR: ING. SERAFÍN C.C		(PLANO DE PIEZA)	
	PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL		No. PZAS.	TOL: NO ESP.
MATERIAL:			A- 4	



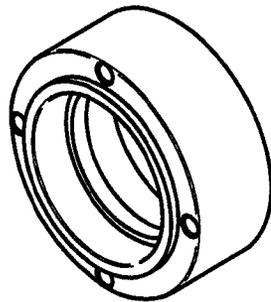
	UNAM- D.E.P.F.I	DIBUJO No. 1	ACOTACIÓN: mm	ESCALA: S/E
	DIBUJO: PATRICIO M.Z	FECHA 04/12/06	<b>Base soporte</b> (PLANO DE PIEZA)	
	DIRECTOR: ING. SERAFÍN C.C			
	PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL	No. PZAS. 1	TOL: NO ESP.	
	MATERIAL: fundicion hierro gris	A- 4		

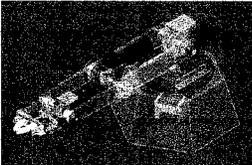


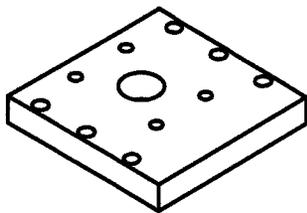
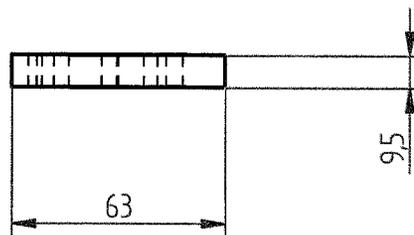
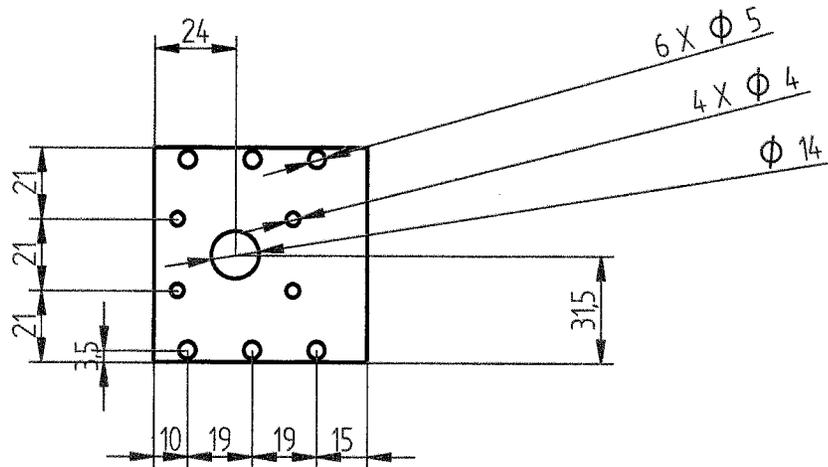
	UNAM- D.E.P.F.I	DIBUJO No. 2	ACOTACIÓN: mm	ESCALA: S/E
	DIBUJO: PATRICIO M.Z	FECHA 04/12/06	<b>Base Hexagonal</b>	
	DIRECTOR: ING. SERAFÍN C.C	(PLANO DE PIEZA)		
	PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL	No. PZAS. 1	TOL: NO ESP.	
	MATERIAL: Placa de acero		A- 4	

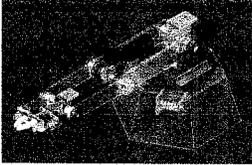


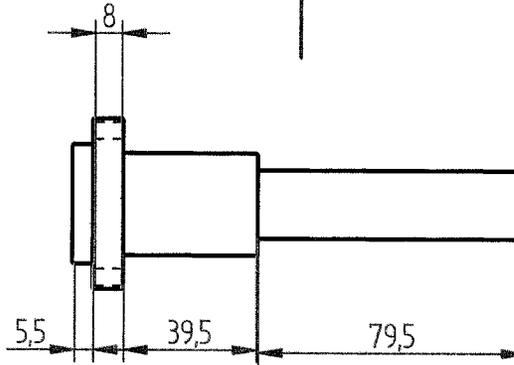
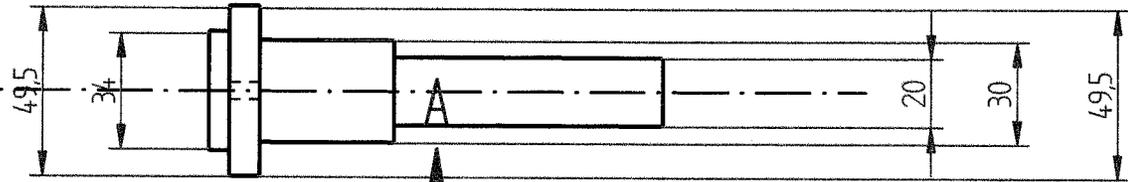
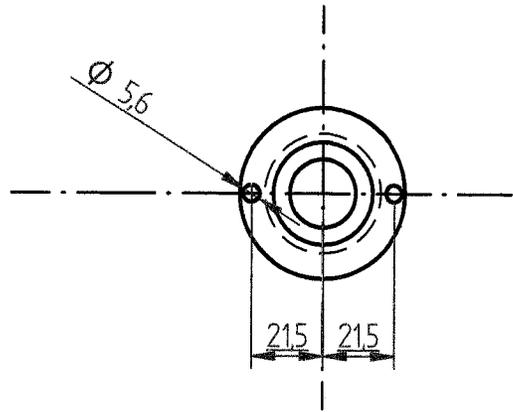
SECTION A-A



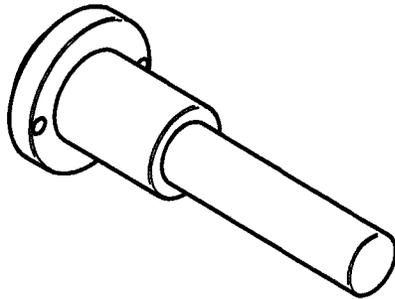
	UNAM- D.E.P.F.I	DIBUJO No. 3	ACOTACIÓN: mm	ESCALA: S/E
	DIBUJO: PATRICIO M.Z	FECHA 04/12/06	<b>Soporte de rodamentos</b> (PLANO DE PIEZA)	
	DIRECTOR: ING. SERAFÍN C			
	<b>PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL</b>		No. PZAS. 1	TOL: 0.1mm
MATERIAL: Acero			A- 4	

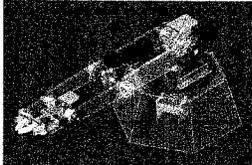


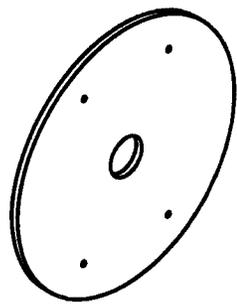
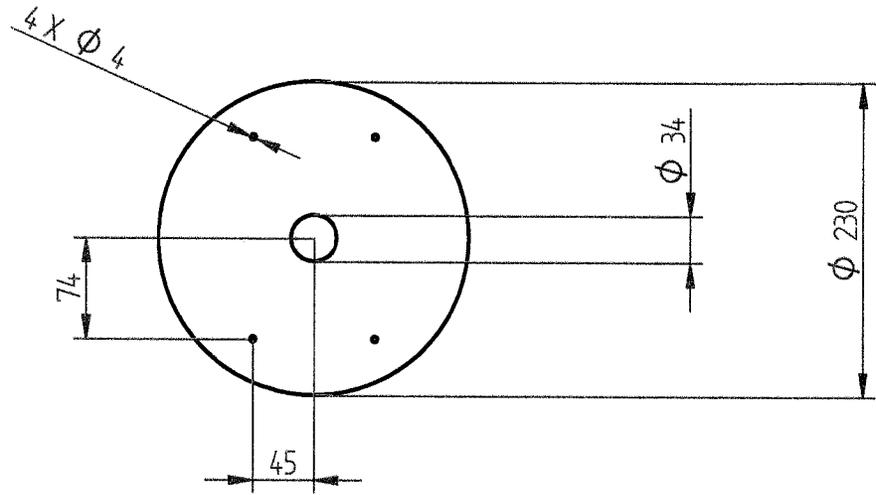
	UNAM-D.E.P.F.I	DIBUJO No. 4	ACOTACIÓN: mm	ESCALA: S/E
	DIBUJO: PATRICIO M.Z	FECHA 04/12/06	<b>Tapa inferior B</b> (PLANO DE PIEZA)	
	DIRECTOR: ING. SERAFÍN C.C			
	PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL		No. PZAS. 1	TOL: 0.1 mm
MATERIAL: ALUMINIO			A-4	



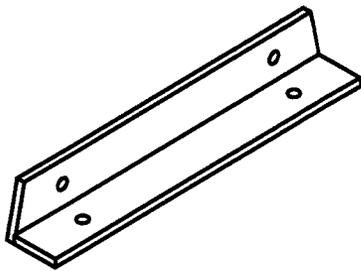
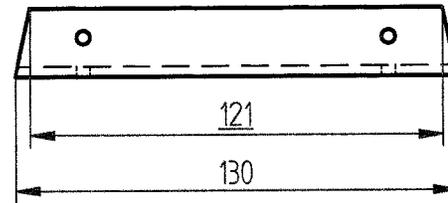
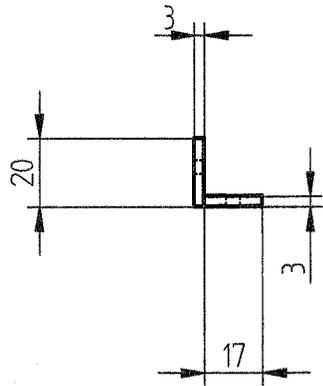
VIEW A

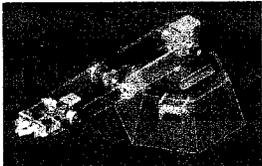


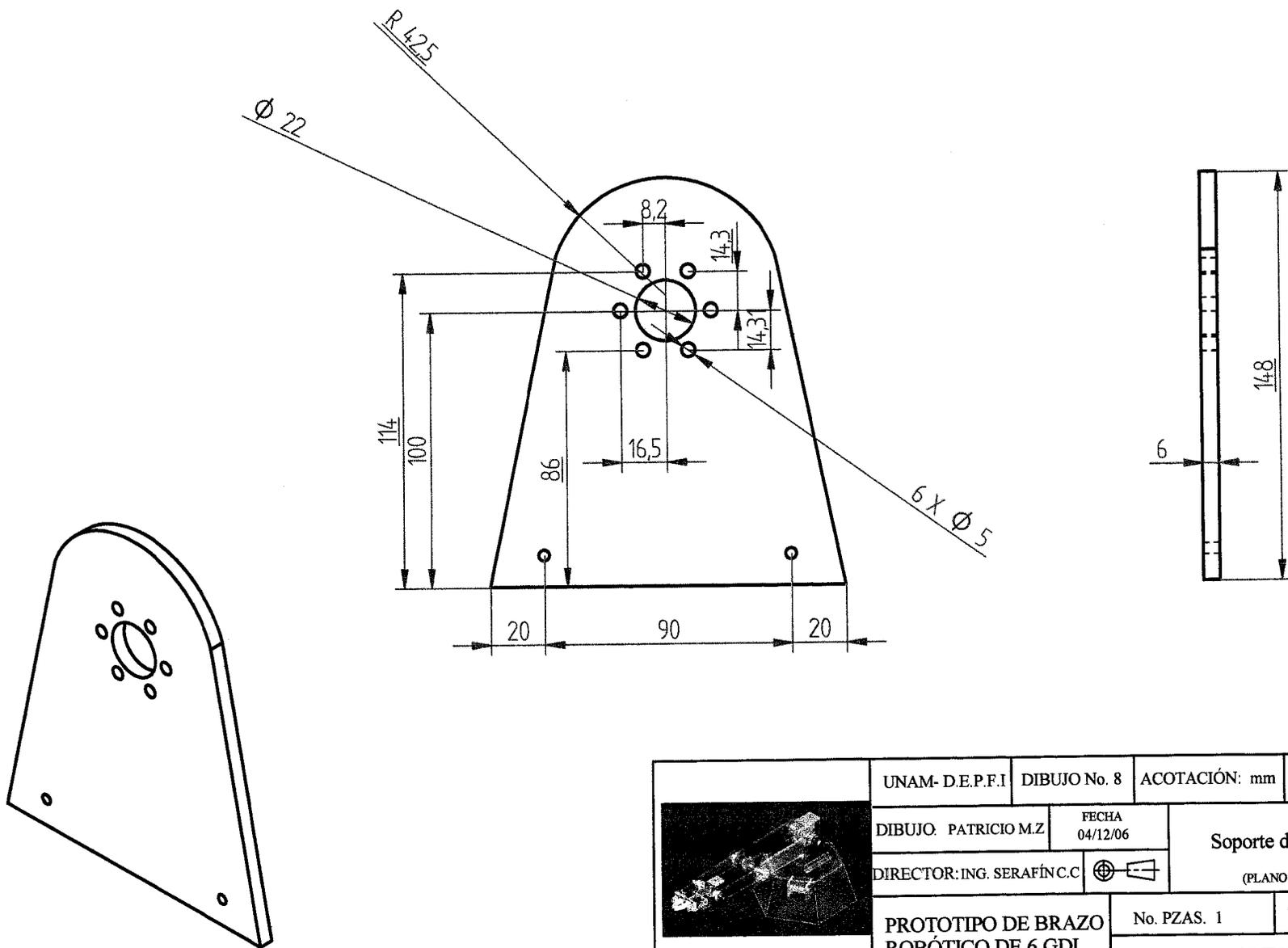
	UNAM- D.E.P.F.I	DIBUJO No. 5	ACOTACIÓN: mm	ESCALA: S/E
	DIBUJO: PATRICIO M.Z	FECHA 04/12/06		<b>Flecha Base</b> (PLANO DE PIEZA)
	DIRECTOR: ING. SERAFÍN C.C			
	PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL		No. PZAS. 1	TOL: 0.1mm
MATERIAL: ALUMINIO			A- 4	



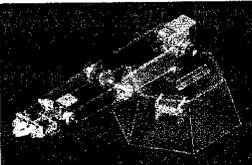
	UNAM- D.E.P.F.I	DIBUJO No. 6	ACOTACIÓN: mm	ESCALA: S/E
	DIBUJO: PATRICIO M.Z	FECHA 04/12/06		<b>Base circular</b> (PLANO DE PIEZA)
	DIRECTOR: ING. SERAFÍN C.C			
	PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL	No. PZAS. 1	TOL: 0.1mm	
MATERIAL: Placa de Acero			A- 4	

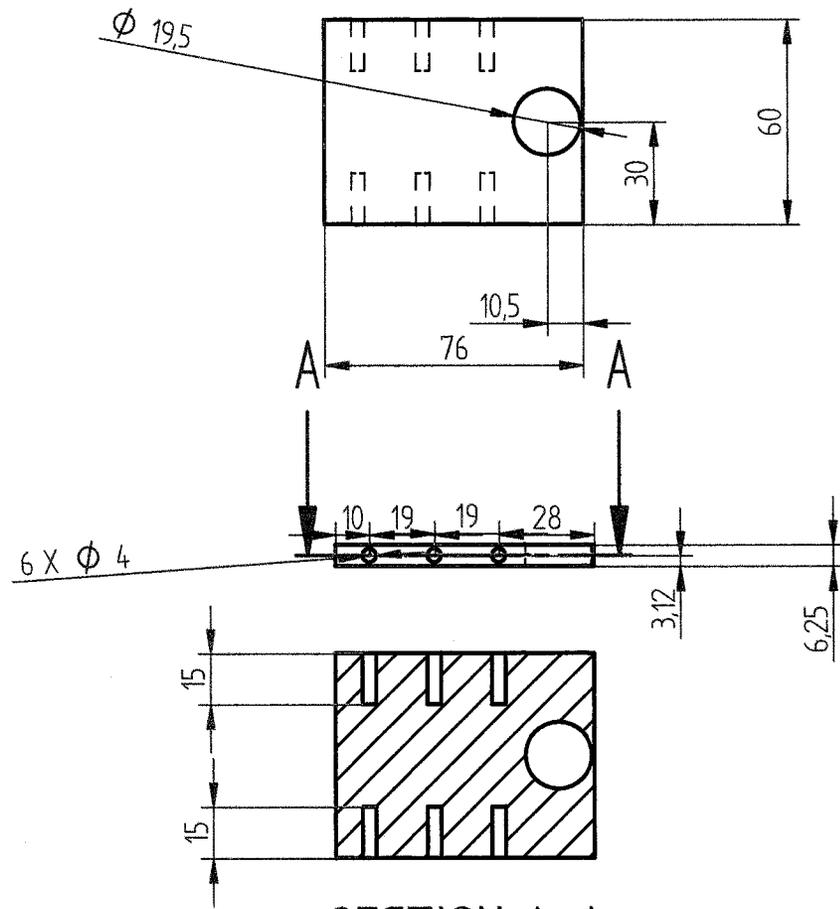
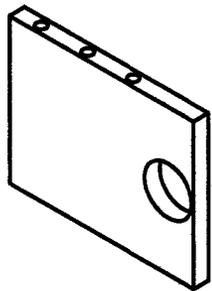


	UNAM- D.E.P.F.I	DIBUJO No. 7	ACOTACIÓN: mm	ESCALA: S/E
	DIBUJO: PATRICIO M.Z	FECHA 04/12/06	<b>Ángulo.</b> (PLANO DE PIEZA)	
	DIRECTOR: ING. SERAFÍN C.C			
	PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL	No. PZAS.	TOL: 0.1mm	
	MATERIAL: ALUMINIO		A- 4	

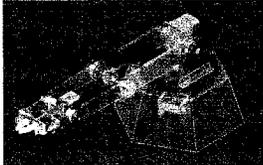


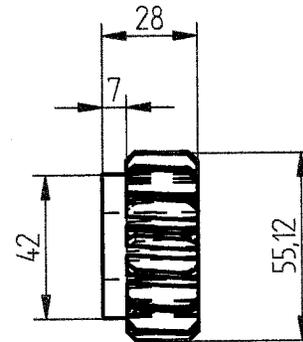
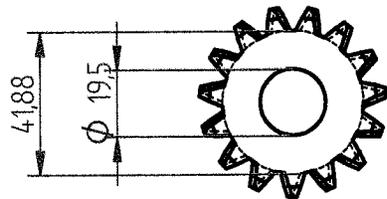
127

	UNAM- D.E.P.F.I	DIBUJO No. 8	ACOTACIÓN: mm	ESCALA: S/E
	DIBUJO: PATRICIO M.Z	FECHA 04/12/06	Soporte de eslabones (PLANO DE PIEZA)	
	DIRECTOR: ING. SERAFÍN C.C		No. PZAS. 1	TOL: 0.1mm
	PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL	MATERIAL: ALUMINIO	A-4	

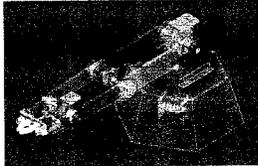


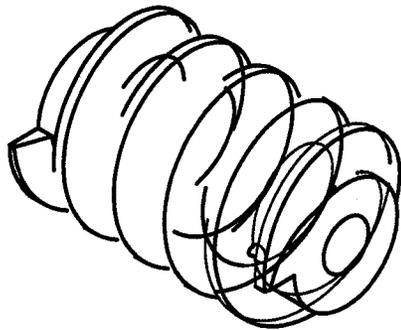
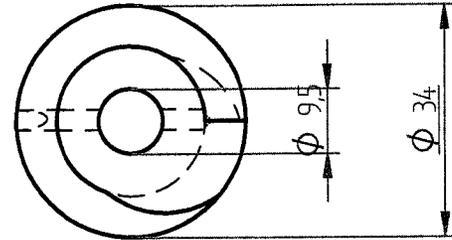
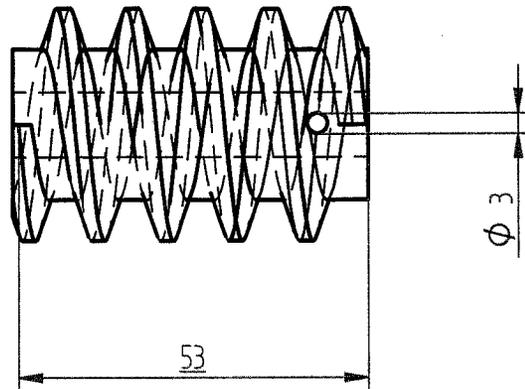
SECTION A-A

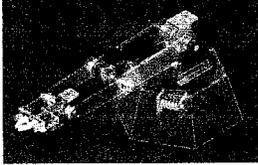
	UNAM- D.E.P.F.I	DIBUJO No. 9	ACOTACIÓN: mm	ESCALA: S/E
	DIBUJO: PATRICIO M.Z	FECHA 04/12/06	<b>Taoa Lateral B</b> (PLANO DE PIEZA)	
	DIRECTOR: ING. SERAFÍN C.C			
	PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL	No. PZAS. 2	TOL: NO RESP.	
MATERIAL: ALUMINIO			A- 4	

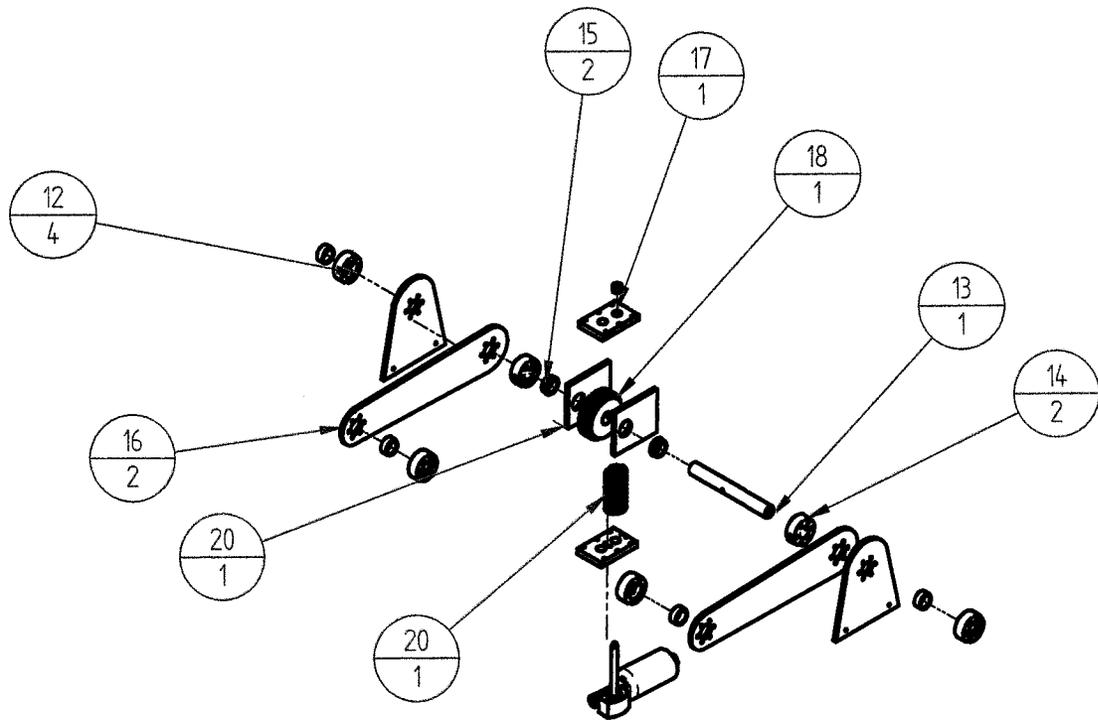


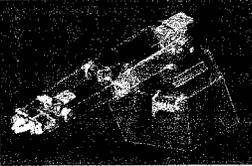
Número de dientes 14  
 Tipo de diente trapezoidal  
 Altura del diente 5mm  
 Ancho del diente 5mm

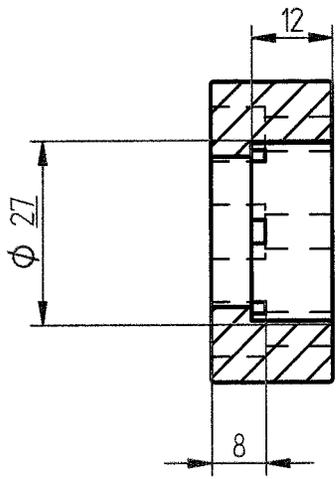
	UNAM- D.E.P.F.I	DIBUJO No. 10	ACOTACIÓN: mm	ESCALA: S/E
	DIBUJO: PATRICIO M.Z	FECHA 04/12/06	<b>Engrane de sinfin B</b> (PLANO DE PIEZA)	
	DIRECTOR: ING. SERAFÍN C.C			
	<b>PROTOTIPO DE BRAZO          ROBÓTICO DE 6 GDL</b>	No. PZAS. 1	TOL: 0.1mm	
	MATERIAL: Fundicion grs		A- 4	



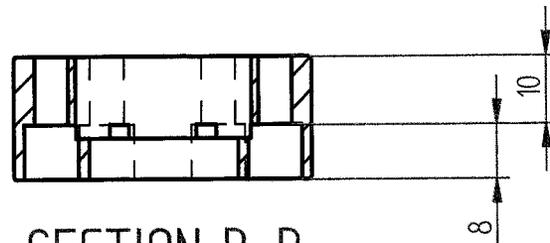
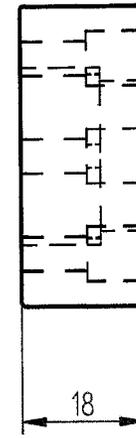
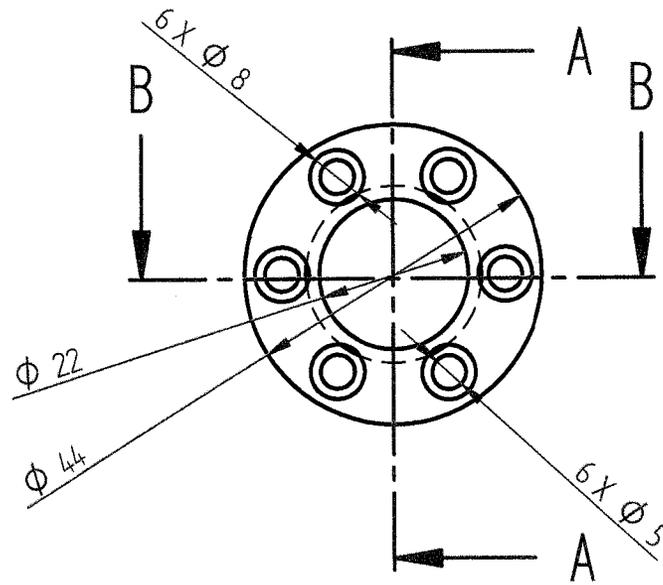
	UNAM- D.E.P.F.I	DIBUJO No. 11	ACOTACIÓN: mm	ESCALA: S/E
	DIBUJO: PATRICIO M.Z	FECHA 04/12/06	<b>Tornillo sinfn B</b> (PLANO DE PIEZA)	
	DIRECTOR: ING. SERAFÍN C.C			
	PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL	No. PZAS. 1	TOL: 0.1 mm	
	MATERIAL: Fundicion gris	A- 4		



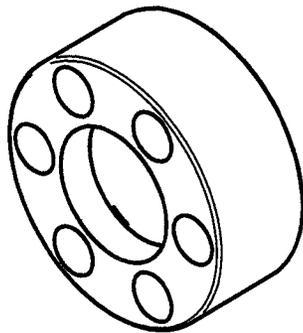
	UNAM- D.E.P.F.I	DIBUJO No.	ACOTACIÓN: mm	ESCALA: S/E
	DIBUJO: PATRICIO MZ	FECHA 04/12/06	<b>Explosivo del eslabón 1</b>	
	DIRECTOR: ING. SERAFÍNC.C		(PLANO DE PIEZA)	
	PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL	No. PZAS.	TOL: NO ESP.	
	MATERIAL:	A- 4		

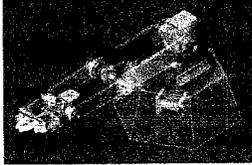


SECTION A-A



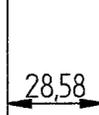
SECTION B-B



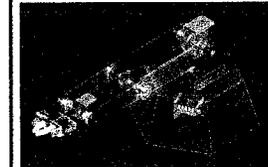
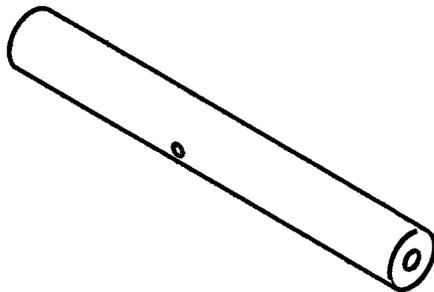
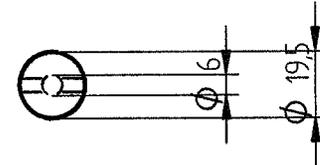
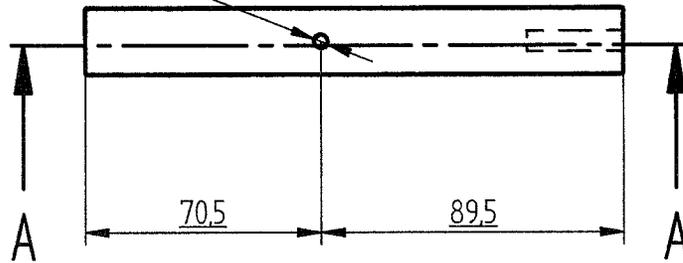
	UNAM- D.E.P.F.I	DIBUJO No. 12	ACOTACIÓN: mm	ESCALA: S/E
	DIBUJO: PATRICIO M.Z	FECHA 04/12/06	Soporte de balero G (PLANO DE PIEZA)	
	DIRECTOR: ING. SERAFÍNC.C			
	PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL	No. PZAS. 1	TOL: 0.1mm	
	MATERIAL: ALUMINIO	A- 4		



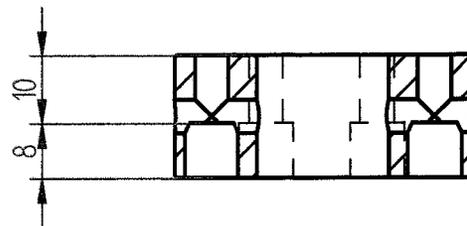
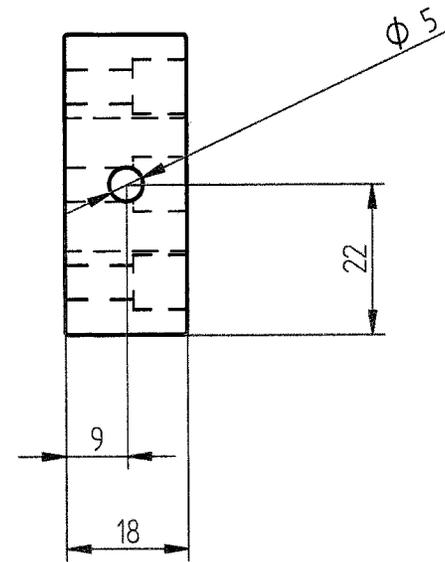
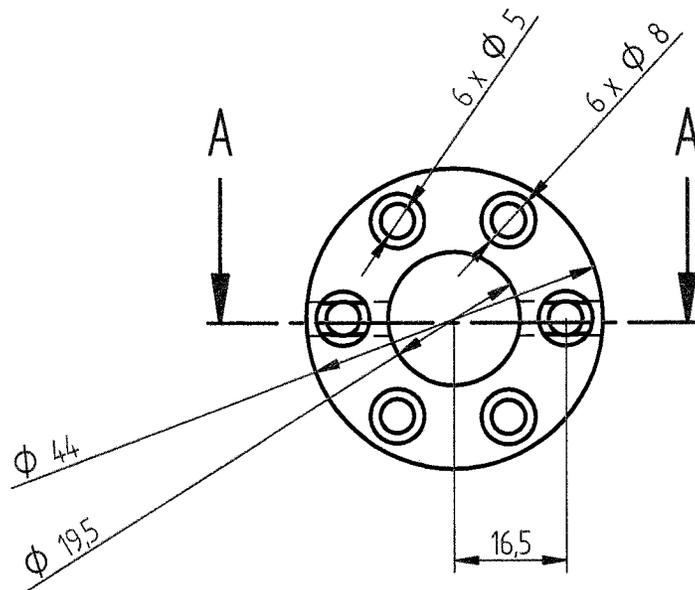
SECTION A-A



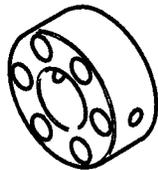
$\phi 4$



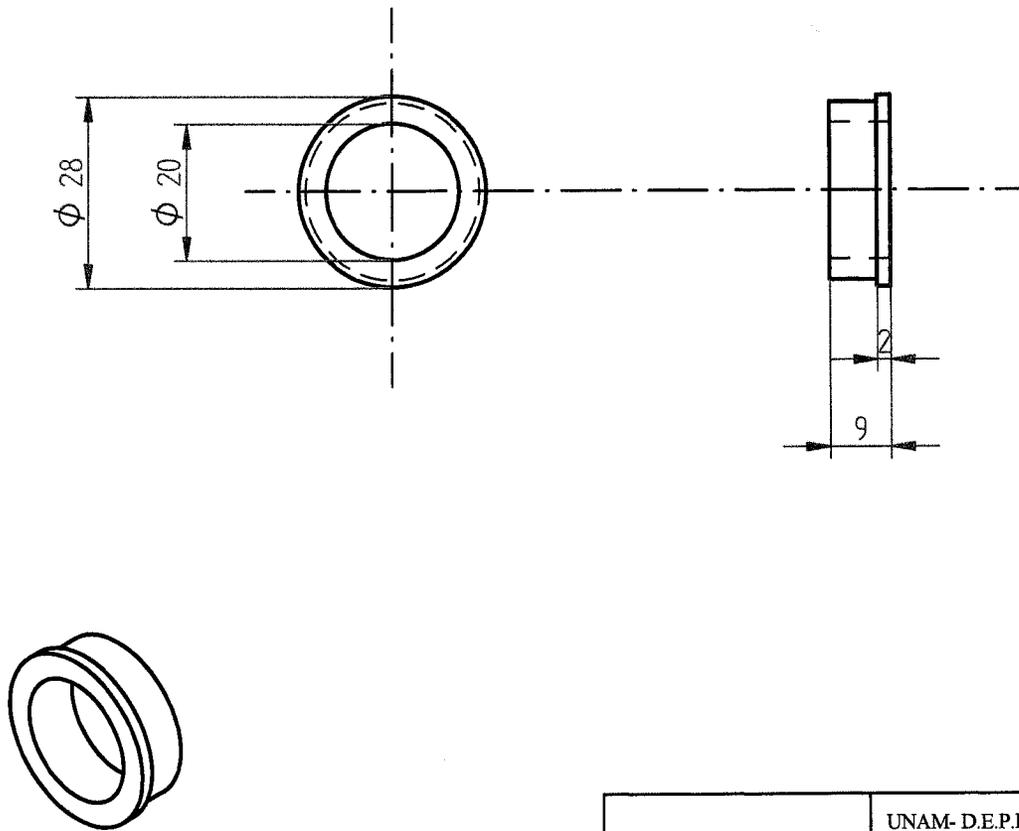
UNAM- D.E.P.F.I	DIBUJO No. 13	ACOTACIÓN: mm	ESCALA: S/E
DIBUJO: PATRICIO M.Z	FECHA 04/12/06	Flecha G (PLANO DE PIEZA)	
DIRECTOR: ING. SERAFÍN C.C			
PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL		No. PZAS. 2	TOL: 0.1mm
		MATERIAL: ALUMINIO.	A- 4

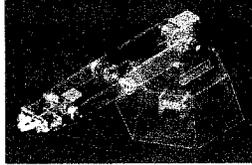


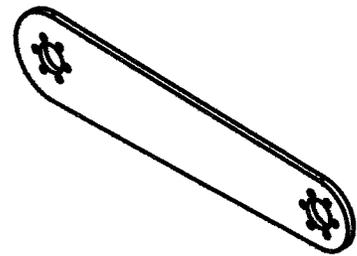
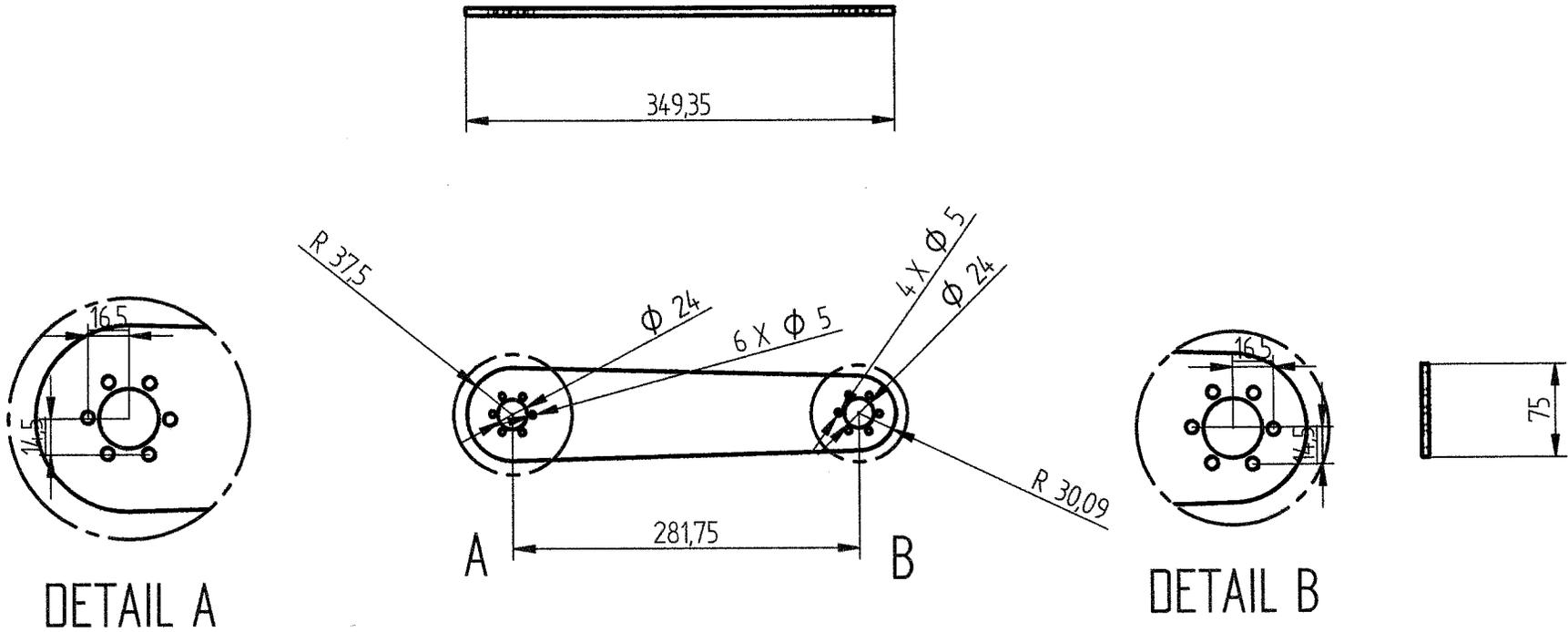
SECTION A-A

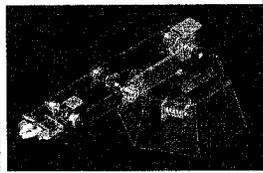


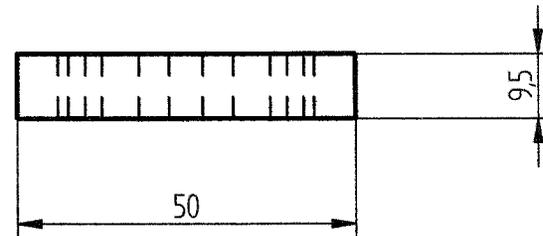
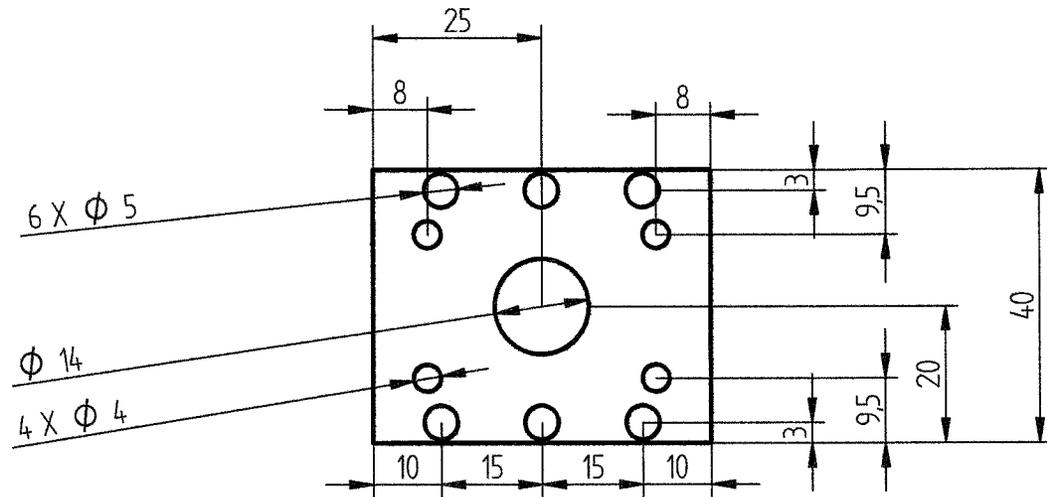
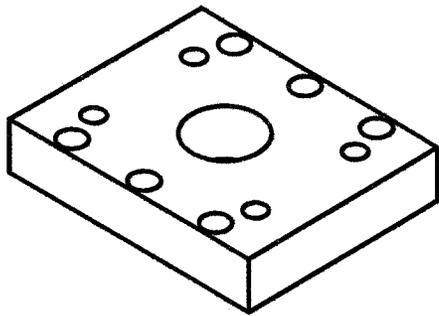
	UNAM- D.E.P.F.I	DIBUJO No. 14	ACOTACIÓN: mm	ESCALA: S/E
	DIBUJO: PATRICIO M.Z	FECHA 04/12/06	Soporte G (PLANO DE PIEZA)	
	DIRECTOR: ING. SERAFÍN C.C			
	PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL	No. PZAS. 4	TOL: 0.1mm	MATERIAL: ALUMINIO.



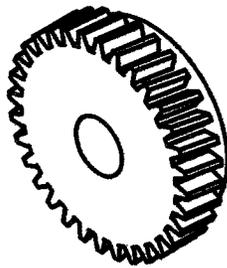
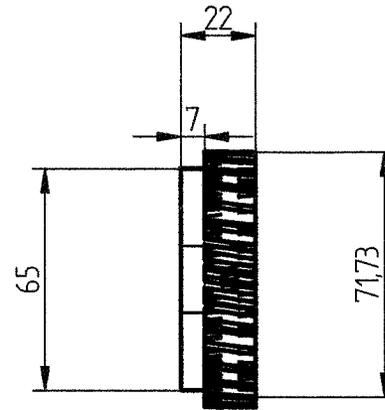
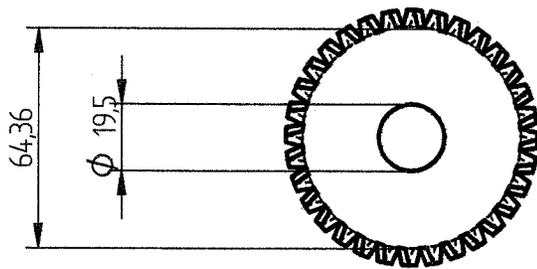
	UNAM- D.E.P.F.I	DIBUJO No. 15	ACOTACIÓN: mm	ESCALA: S/E
	DIBUJO: PATRICIO M.Z	FECHA 04/12/06	<b>Buje G</b> (PLANODE PIEZA)	
	DIRECTOR: ING. SERAFÍNC.C			
	PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL	No. PZAS. 6	TOL: 0.1mm	
	MATERIAL: Latón		A- 4	



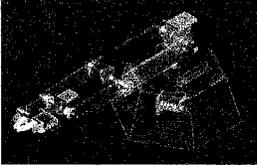
	UNAM- D.E.P.F.I	DIBUJO No. 16	ACOTACIÓN: mm	ESCALA: S/E
	DIBUJO: PATRICIO M.Z	FECHA 04/12/06		<b>Eslabón G</b> (PLANO DE PIEZA)
	DIRECTOR: ING. SERAFÍN C.C			
	PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL	No. PZAS. 2	TOL: 0.1mm	
	MATERIAL: ALUMINIO		A- 4	

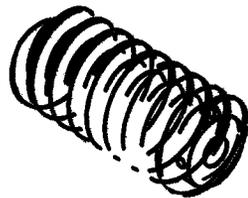
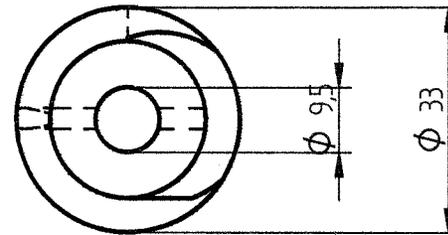
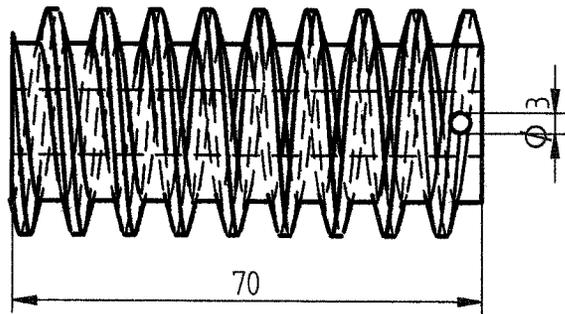


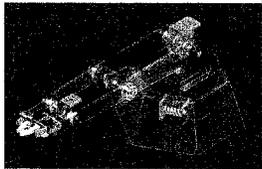
	UNAM-D.E.P.F.I	DIBUJO No. 17	ACOTACIÓN: mm	ESCALA: S/E
	DIBUJO: PATRICIO M.Z	FECHA 04/12/06	Tapa inferior E1 (PLANO DE PIEZA)	
	DIRECTOR: ING. SERAFÍN C.C			
	PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL	No. PZAS. 2	TOL: 0.1mm	MATERIAL: ALUMINIO

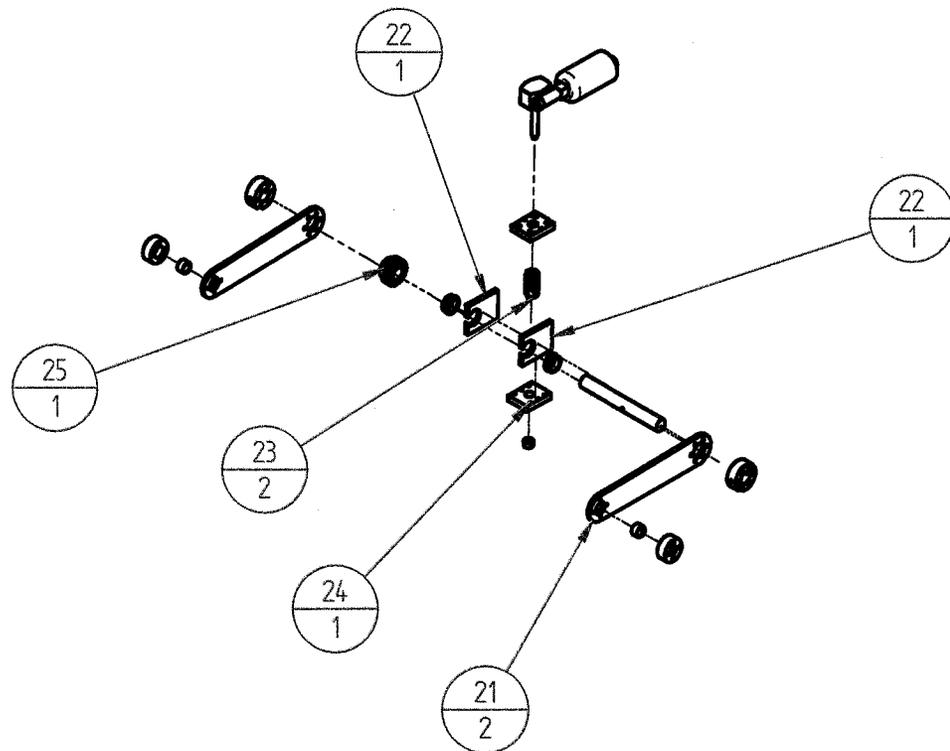


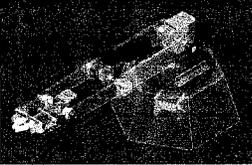
Número de dientes 32  
 Tipo de diente trapezoidal  
 Altura del diente 4mm  
 Ancho del diente 4mm

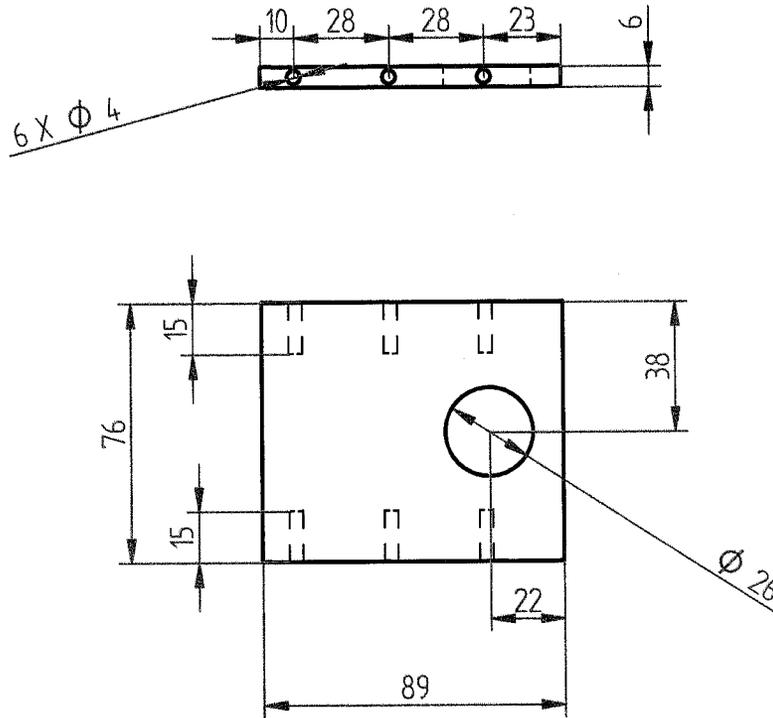
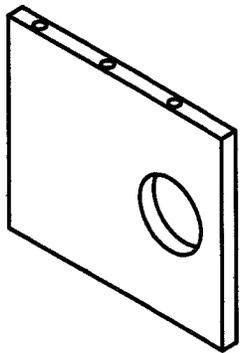
	UNAM- D.E.P.F.I	DIBUJO No. 18	ACOTACIÓN: mm	ESCALA: S/E
	DIBUJO: PATRICIO M.Z.	FECHA 04/12/06	Engrane 1E (PLANO DE PIEZA)	
	DIRECTOR: ING. SERAFÍN C.C.			
	PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL	No. PZAS. 1	TOL: 0.1mm	
	MATERIAL: FUNDICIONGRIS	A- 4		



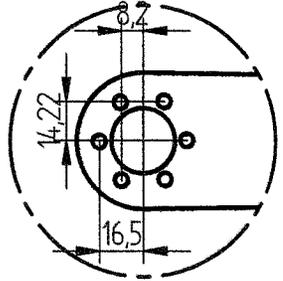
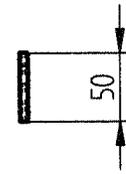
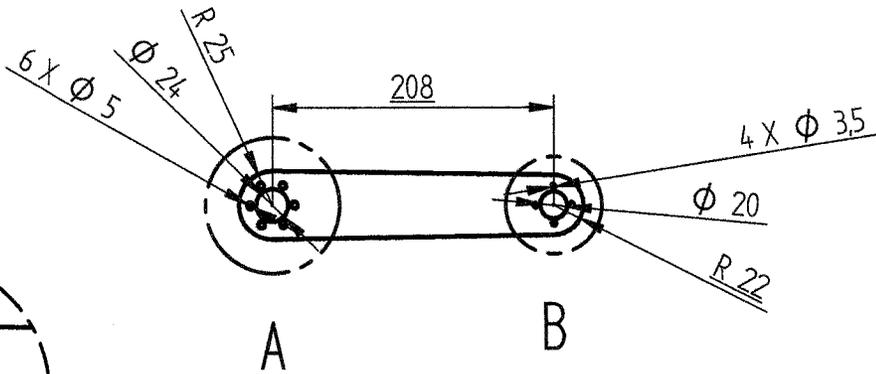
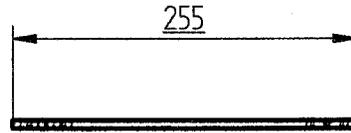
	UNAM- D.E.P.F.I	DIBUJO No. 19	ACOTACIÓN: mm	ESCALA: S/E
	DIBUJO: PATRICIO M.Z	FECHA 04/12/06		<b>Tornillo sinfin G</b> (PLANO DE PIEZA)
	DIRECTOR: ING. SERAFÍN C.C			
	PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL	No. PZAS. 1	TOL: 0.1mm	
	MATERIAL: Fundicion Gris		A- 4	



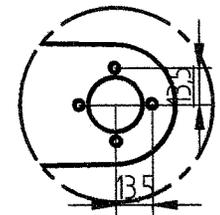
	UNAM- D.E.P.F.I	DIBUJO No.	ACOTACIÓN: mm	ESCALA: S/E
	DIBUJO: PATRICIO M.Z	FECHA 04/12/06	Explosivo eslabon 2	
	DIRECTOR: ING. SERAFÍNC.C		(PLANO DE PIEZA)	
	PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL	No. PZAS.	TOL: NO ESP.	
	MATERIAL:	A-4		



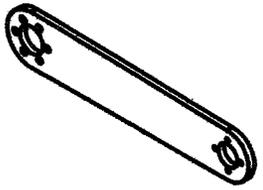
	UNAM- D.E.P.F.I	DIBUJO No. 20	ACOTACIÓN: mm	ESCALA: S/E
	DIBUJO: PATRICIO M.Z	FECHA 04/12/06	<b>Tapa lateral E1</b> (PLANO DE PIEZA)	
	DIRECTOR: ING. SERAFÍN C.			
	PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL	No. PZAS. 2	TOL: 0.1mm	
MATERIAL: ALUMINIO			A-4	



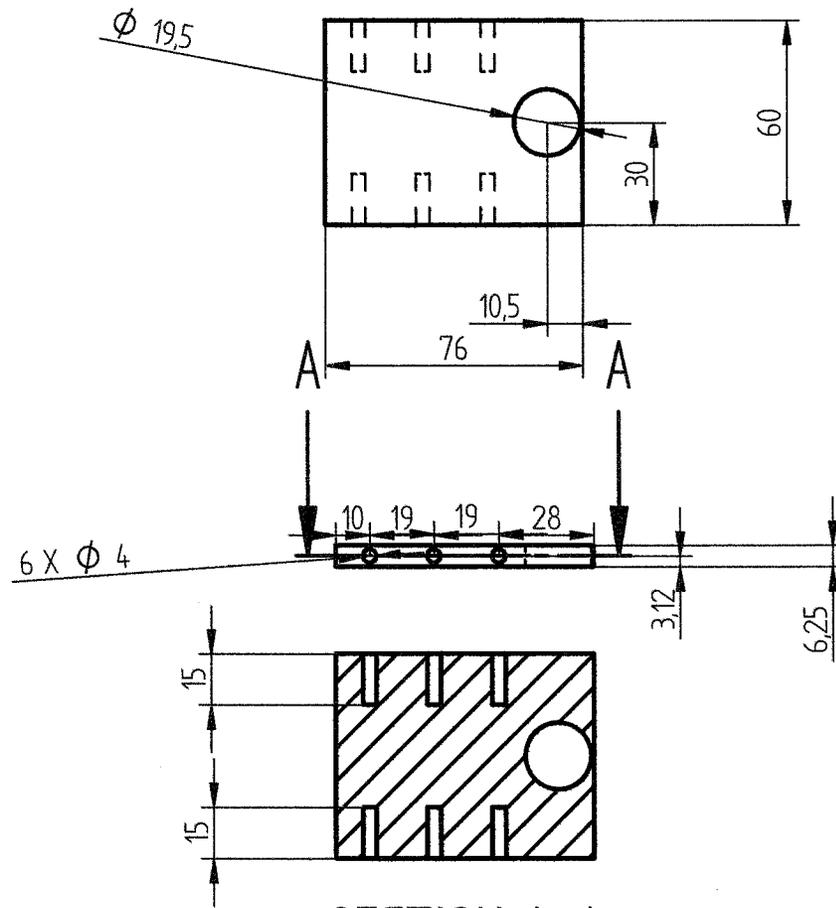
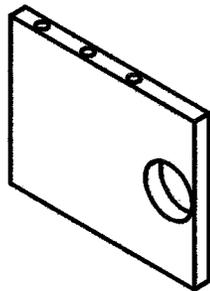
DETAIL A



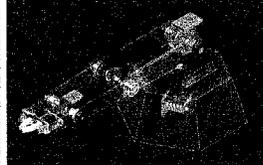
DETAIL B

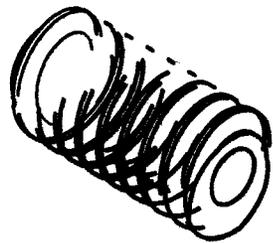
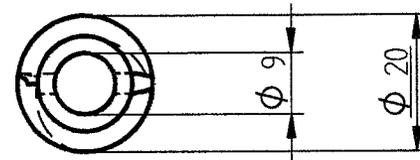
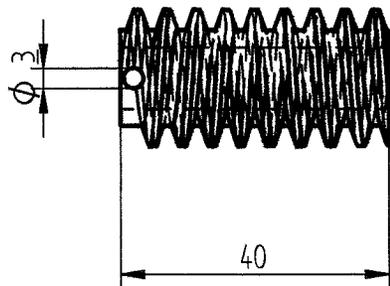


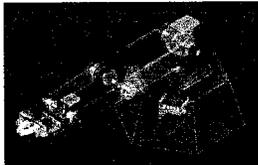
	UNAM- D.E.P.F.I	DIBUJO No. 21	ACOTACIÓN: mm	ESCALA: S/E
	DIBUJO: PATRICIO M.Z	FECHA 04/12/06	Eslabón m (PLANO DE PIEZA)	
	DIRECTOR: ING. SERAFÍN C.C			
	PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL		No. PZAS. 1	TOL: 0.1mm
MATERIAL: ALUMINIO			A-4	



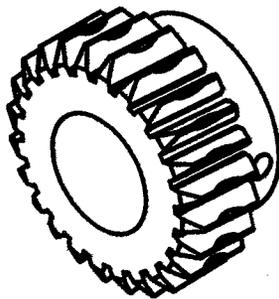
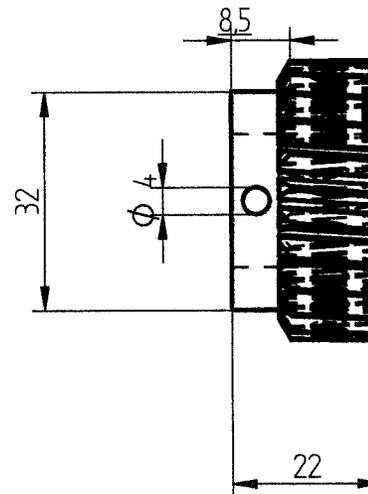
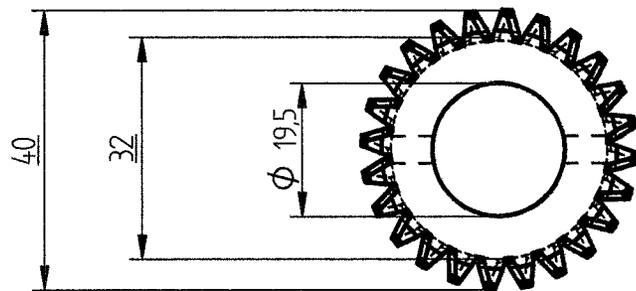
SECTION A-A

	UNAM- D.E.P.F.I	DIBUJO No. 22	ACOTACIÓN: mm	ESCALA: S/E
	DIBUJO: PATRICIO M.Z	FECHA 04/12/06	<b>Taoa Lateral B</b> (PLANO DE PIEZA)	
	DIRECTOR: ING. SERAFÍN C.C			
	PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL	No. PZAS. 2	TOL: 0.1mm	
MATERIAL: ALUMINIO			A- 4	



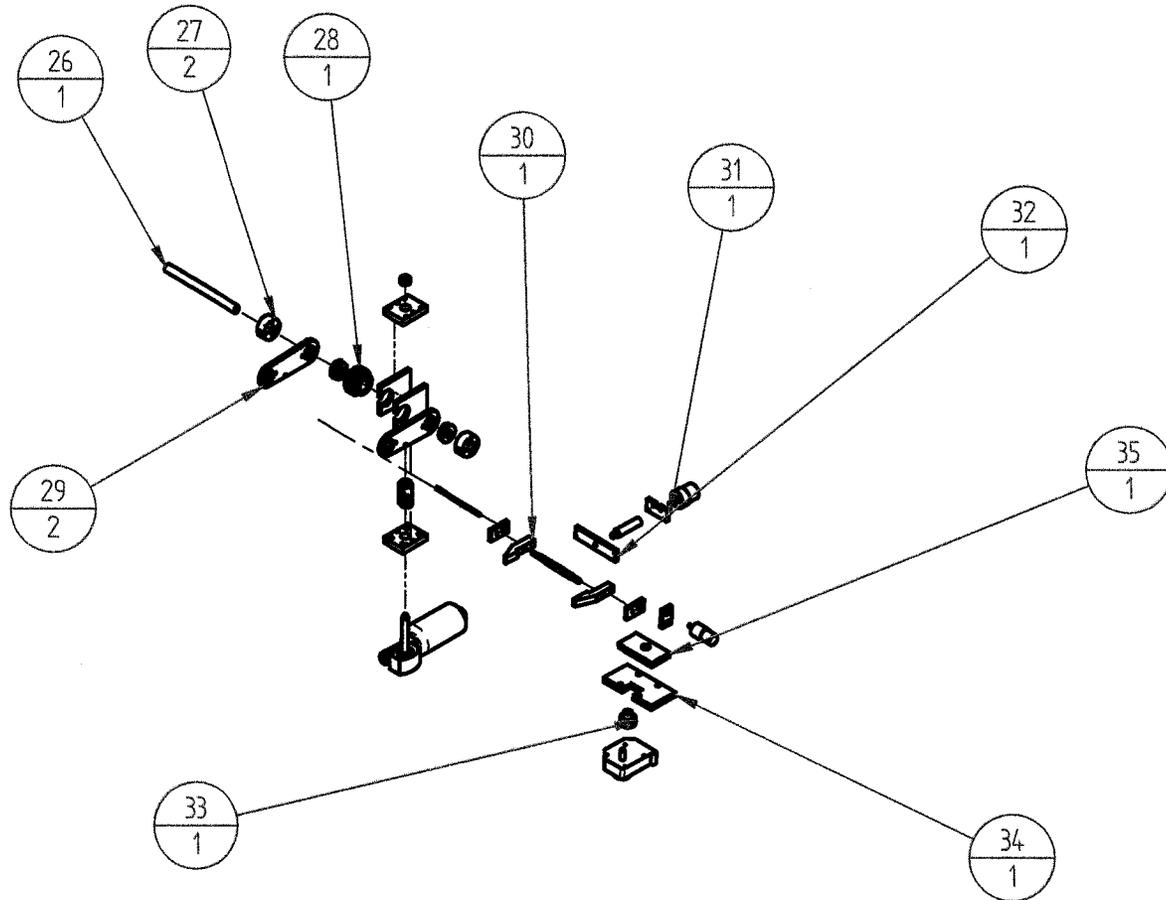
	UNAM- D.E.P.F.I	DIBUJO No. 23	ACOTACIÓN: mm	ESCALA: S/E
	DIBUJO: PATRICIO M.Z	FECHA 04/12/06	<b>Tornillo sinfín M</b> (PLANO DE PIEZA)	
	DIRECTOR: ING. SERAFÍN C.C			
	<b>PROTOTIPO DE BRAZO          ROBÓTICO DE 6 GDL</b>	No. PZAS. 2	TOL: 0.1mm	
MATERIAL: Fundicion grs			A- 4	

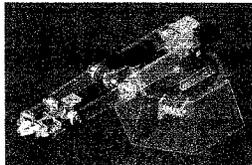


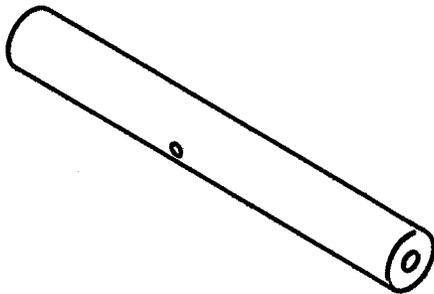
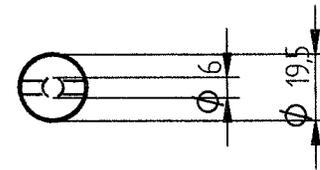
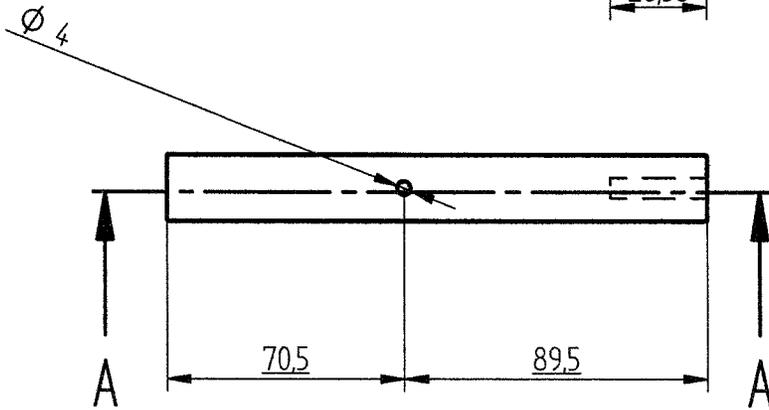


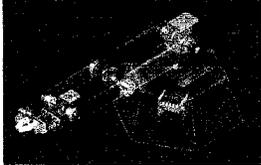
Número de dientes 24  
 Tipo de diente trapezoidal  
 Altura del diente 2mm  
 Ancho del diente 3mm

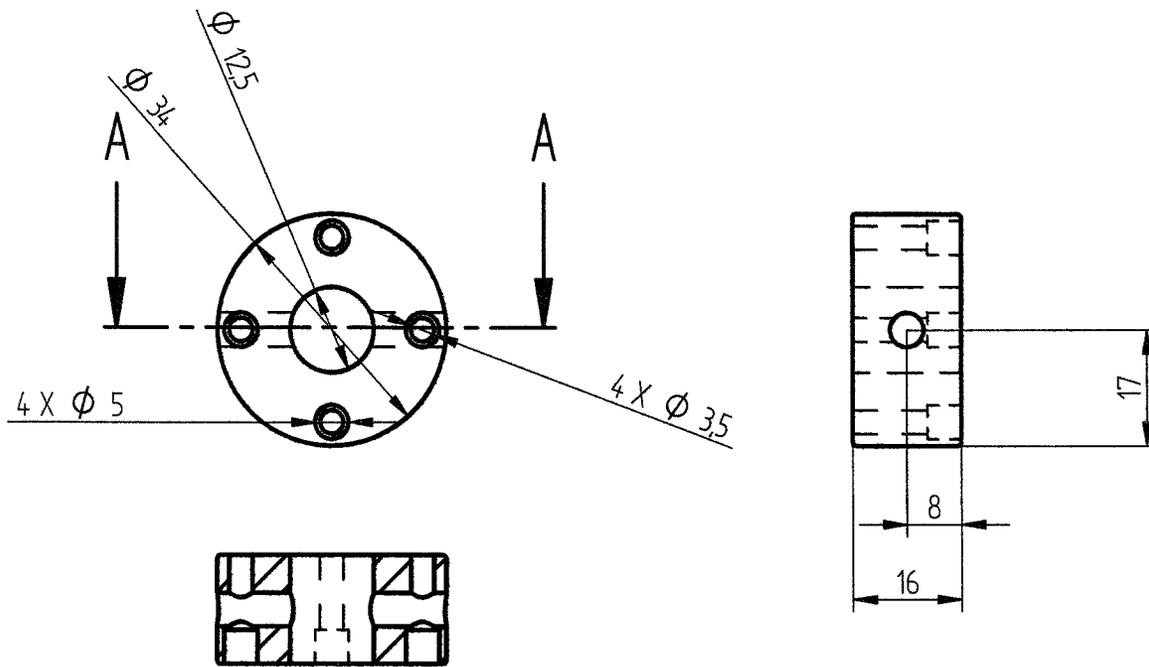
	UNAM- D.E.P.F.I	DIBUJO No. 25	ACOTACIÓN: mm	ESCALA: S/E
	DIBUJO: PATRICIO M.Z	FECHA 04/12/06	Engrande de sinfin C (PLANO DE PIEZA)	
	DIRECTOR: ING. SERAFÍN C.C			
	PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL		No. PZAS. 2	TOL: 0.1mm
MATERIAL: FUNDICIONGRIS			A- 4	



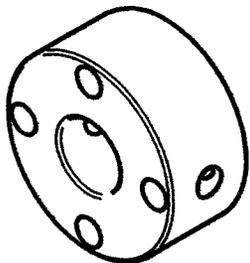
	UNAM- D.E.P.F.I	DIBUJO No.	ACOTACIÓN: mm	ESCALA: S/E
	DIBUJO: PATRICIO M.Z	FECHA 04/12/06	<b>Explosivo Efecto Final</b> (PLANO DE PIEZA)	
	DIRECTOR: ING. SERAFÍN C.C			
	PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL	No. PZAS.	TOL: NO ESP.	
MATERIAL:	A-4			



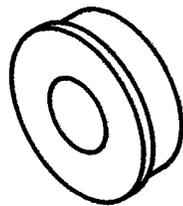
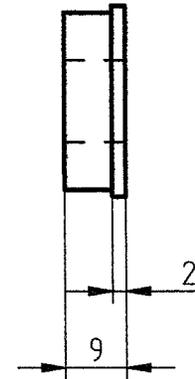
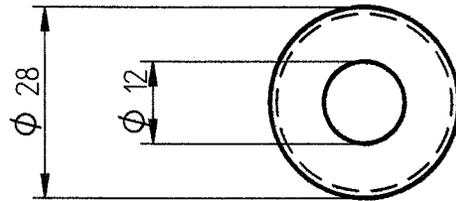
	UNAM- D.E.P.F.I	DIBUJO No. 26	ACOTACIÓN: mm	ESCALA: S/E
	DIBUJO: PATRICIO M.Z	FECHA 04/12/06	<b>Flecha C</b>	
	DIRECTOR: ING. SERAFÍN C.C	(PLANO DE PIEZA)		
	PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL	No. PZAS. 1	TOL: 0.1mm	
	MATERIAL: ALUMINIO.	A- 4		

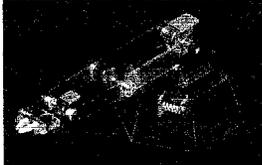


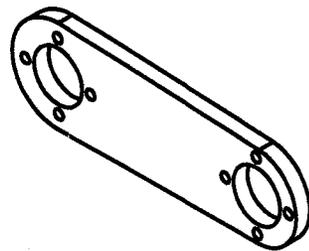
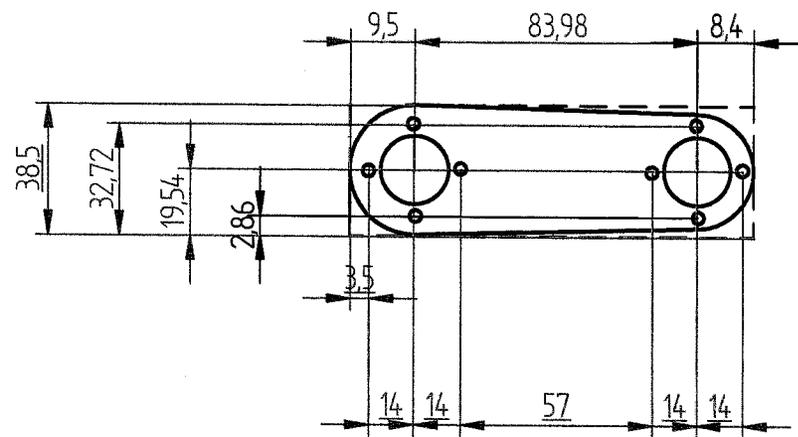
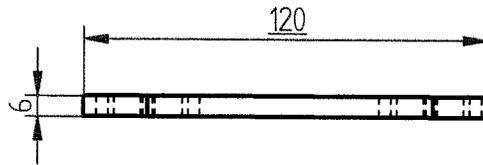
SECTION A-A

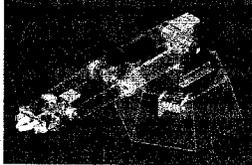


	UNAM- D.E.P.F.I	DIBUJO No. 27	ACOTACIÓN: mm	ESCALA: S/E
	DIBUJO: PATRICIO M.Z	FECHA 04/12/06	<b>Soporte C</b> (PLANO DE PIEZA)	
	DIRECTOR: ING. SERAFÍN C.C			
	PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL	No. PZAS. 2	TOL: 0.1mm	
	MATERIAL: ALUMINIO	A- 4		

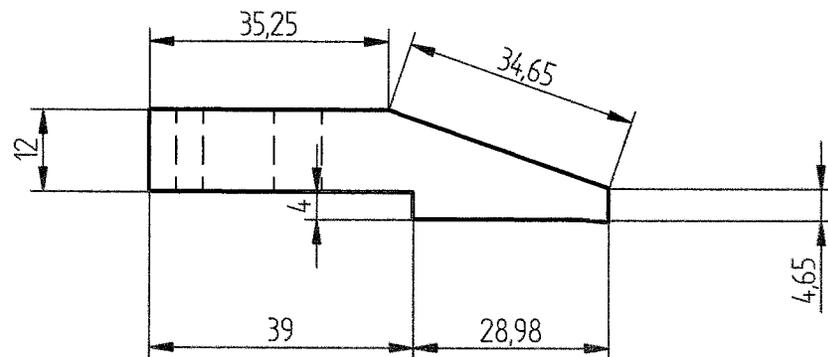
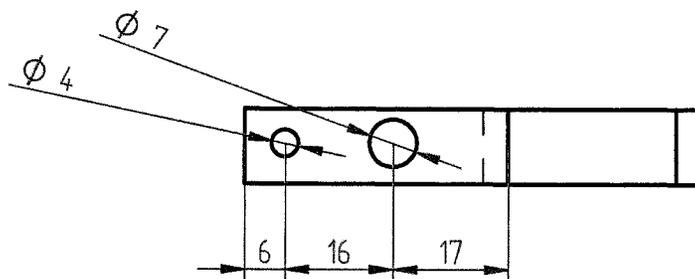
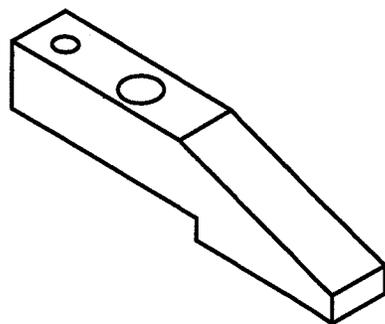


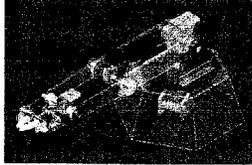
	UNAM- D.E.P.F.I	DIBUJO No. 28	ACOTACIÓN: mm	ESCALA: S/E
	DIBUJO: PATRICIO M.Z	FECHA 04/12/06	<b>Buje Ch</b> (PLANO DE PIEZA)	
	DIRECTOR: ING. SERAFÍN C.C			
	PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL	No. PZAS. 2	TOL: 0.1mm	
	MATERIAL: LATÓN		A- 4	

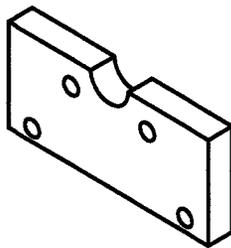
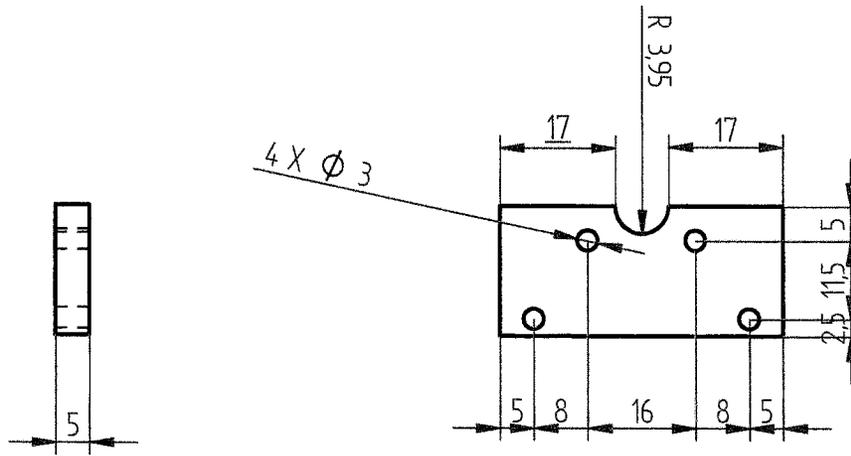


	UNAM- D.E.P.F.I	DIBUJO No. 29	ACOTACIÓN: mm	ESCALA: S/E
	DIBUJO: PATRICIO M.Z	FECHA 04/12/06	<b>Eslabon tres</b> (PLANO DE PIEZA)	
	DIRECTOR: ING. SERAFÍN C.C			
	<b>PROTOTIPO DE BRAZO          ROBÓTICO DE 6 GDL</b>	No. PZAS. 1	TOL: 0.1mm	
MATERIAL: ALUMINIO			A- 4	

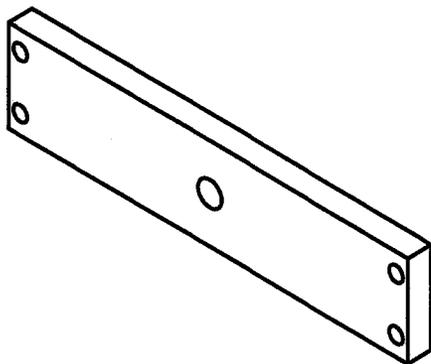
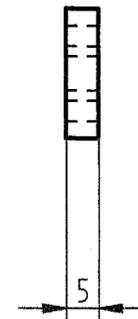
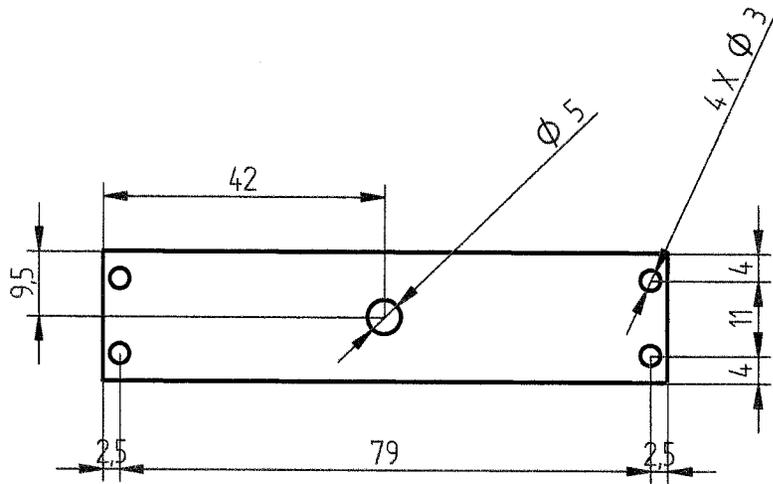
ISI



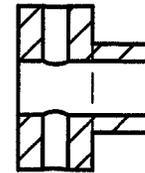
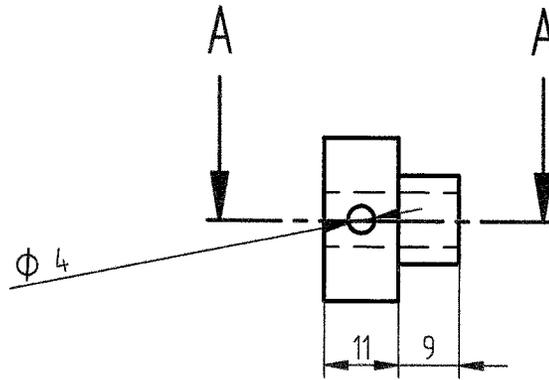
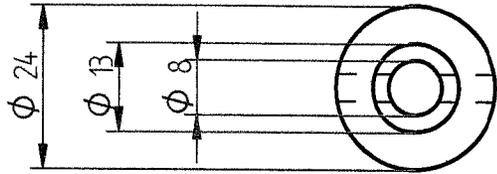
	UNAM- D.E.P.F.I	DIBUJO No. 30	ACOTACIÓN: mm	ESCALA: S/E
	DIBUJO: PATRICIO M.Z	FECHA 04/12/06	<b>Pinza</b> (PLANO DE PIEZA)	
	DIRECTOR: ING. SERAFÍN C.C			
	PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL	No. PZAS. 2	TOL: 0.1mm	
	MATERIAL: ALUMINIO.		A- 4	



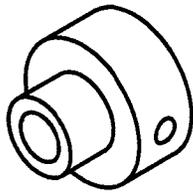
	UNAM- D.E.P.F.I	DIBUJO No. 31	ACOTACIÓN: mm	ESCALA: S/E
	DIBUJO. PATRICIO M.Z	FECHA 04/12/06	<b>Soporte M_Roll</b> (PLANO DE PIEZA)	
	DIRECTOR: ING. SERAFÍN C.C			
	PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL		No. PZAS. 1	TOL: 0.1mm
MATERIAL: ALUMINIO.			A-4	

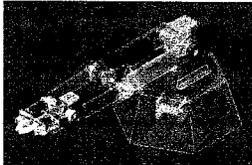


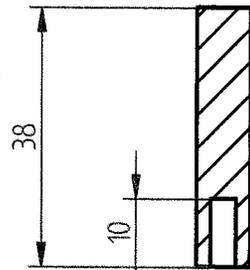
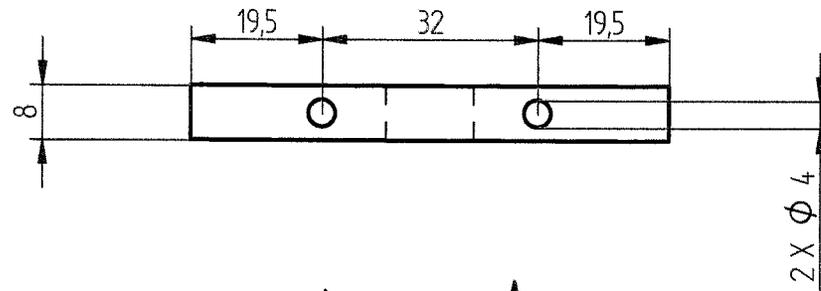
	UNAM- D.E.P.F.I	DIBUJO No. 32	ACOTACIÓN: mm	ESCALA: S/E
	DIBUJO: PATRICIO M.Z	FECHA 04/12/06		<b>Caja G_L</b> (PLANODE PIEZA)
	DIRECTOR: ING. SERAFÍNC.C	⊕		
	PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL		No. PZAS. 1	TOL: 0.1mm
MATERIAL: ALUMINIO.			A- 4	



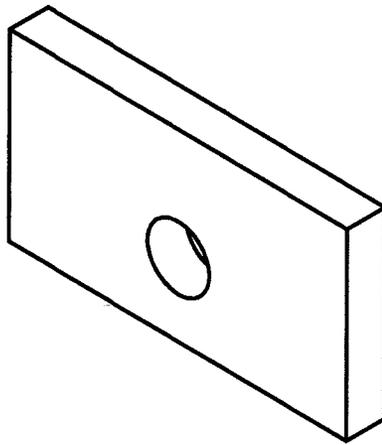
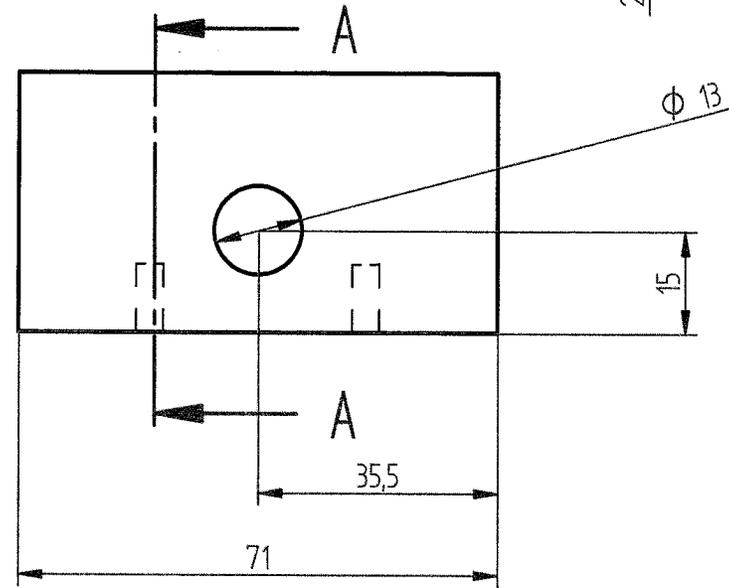
SECTION A-A



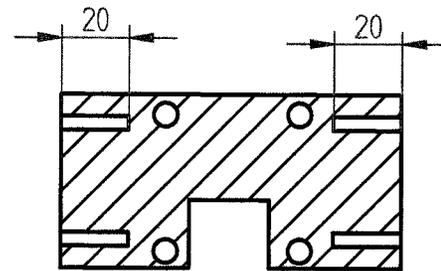
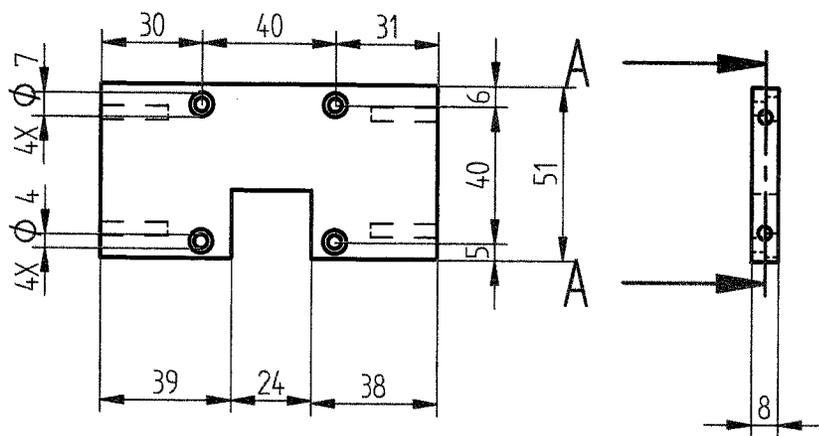
	UNAM- D.E.P.F.I	DIBUJO No. 33	ACOTACIÓN: mm	ESCALA: S/E
	DIBUJO: PATRICIO M.Z	FECHA 04/12/06		<b>Buje Roll</b> (PLANO DE PIEZA)
	DIRECTOR: ING. SERAFÍN C.C			
	PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL	No. PZAS. 1	TOL: 0.1mm	
	MATERIAL: ALUMINIO.			A- 4



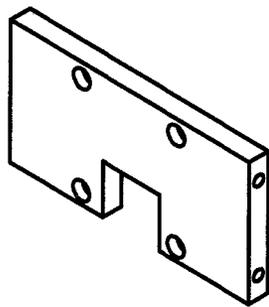
SECTION A-A

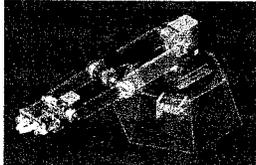


	UNAM- D.E.P.F.I	DIBUJO No. 34	ACOTACIÓN: mm	ESCALA: S/E
	DIBUJO: PATRICIO M.Z	FECHA 04/12/06	<b>Soporte Roll</b> (PLANO DE PIEZA)	
	DIRECTOR: ING. SERAFÍN C.C			
PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL		No. PZAS. 1	TOL: 0.1mm	
MATERIAL: ALUMINIO.			A- 4	



SECTION A-A



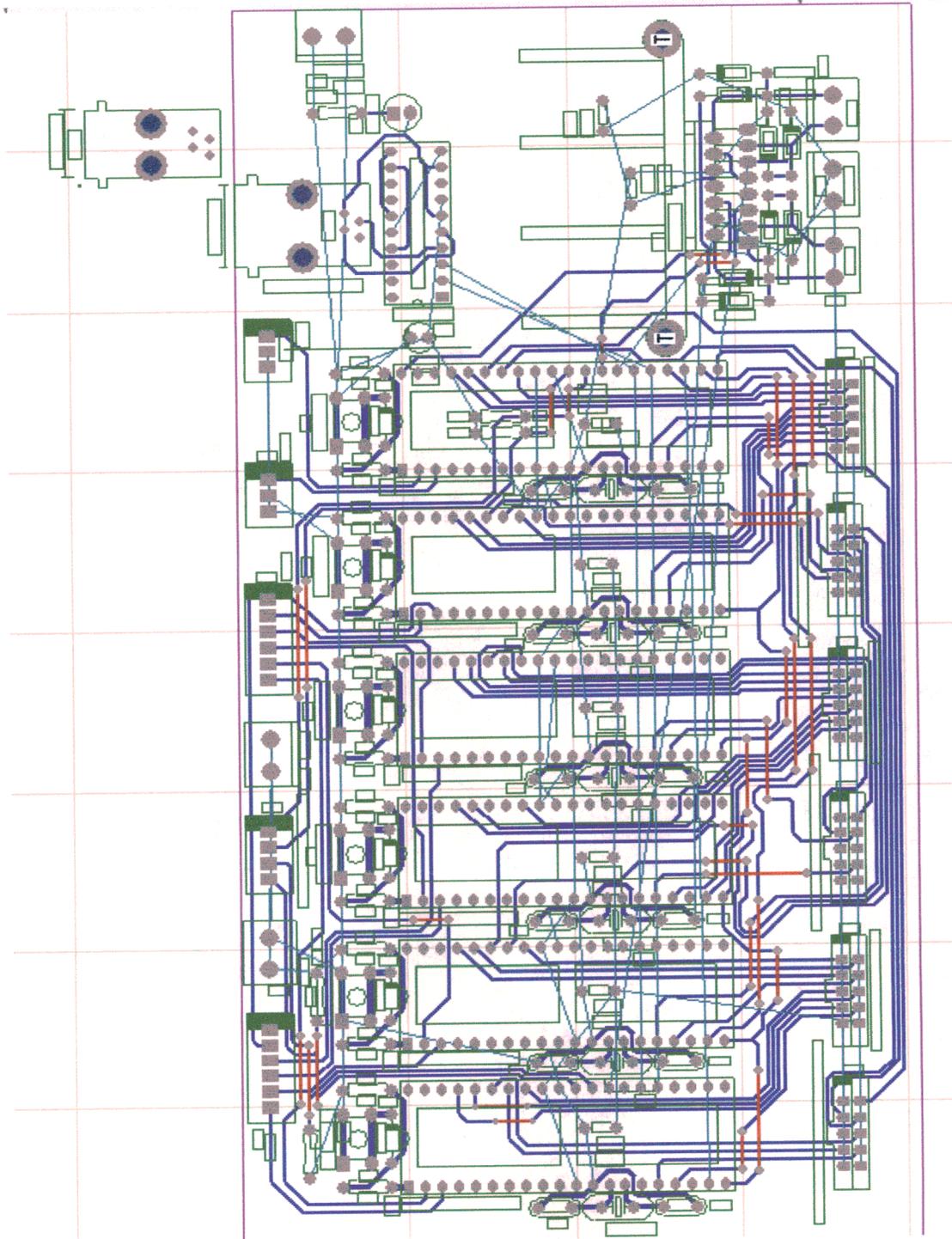
	UNAM- D.E.P.F.I	DIBUJO No. 35	ACOTACIÓN: mm	ESCALA: S/E
	DIBUJO: PATRICIO M.Z	FECHA 04/12/06	<b>Soporte Yaw M</b>	
	DIRECTOR: ING. SERAFÍN C.C		(PLANO DE PIEZA)	
	<b>PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO DE 6 GDL</b>		No. PZAS. 1	TOL: 0.1mm
			MATERIAL: ALUMINIO.	A- 4

# APÉNDICE

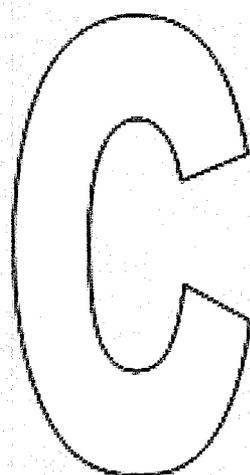
# B

**Diagrama “PCB” de la tarjeta de control de los microcontroladores**

Diagrama de la tarjeta de control de los microcontroladores (PCB).



# APÉNDICE



**Código fuente del programa para el  
manipulador robótico de 6GDL**

## Código fuente del programa.

### Código fuente del Programa para el microcontrolador\_1.

```

//*****Programa que permite accionar al motor _1.
Dependiendo del carácter que llega de la PC*****//

```

```

#include <16F877.h>
#fuses HS, NOWDT
#use delay(clock = 2000000)
#use rs232(baud=9600, xmit=PIN_C6, rcv=PIN_C7,
parity=N, bits=8)
#use i2c(Master, SDA = PIN_C4, SCL = PIN_C3, FAST)
#include <math.h>

```

```

//Registros de la usart:
#BYTE RCREG=0x1A
#BIT RCIF=0x0C.533

```

```

//Declaracion de Funciones

```

```

void Led();
void CalculosIni();
void CalculosFin();
void manda_cpu();
void manda_BraFin();
void manda_Home();
void Digitalizador();
void carga();
void Mueve();

```

```

//Declaracion de Variables

```

```

int datos[3]={0};
int datos2[3]={0};
int datos3[3]={0};
int datos4[7]={0};
int dato1[2]={0};
int dato2[2]={0};
int dato3[2]={0};
int rxdato = 0;
int flag2 = 0;
int dato_in = 0;
int valor1=0;
int Va=0;

```

```

//****interrupción por recepción de dato por RS232 *****//
//*****//

```

```

#int_rda
void serial_isr()
{
disable_interrupts(global);

```

```

chechar: if(RCIF)
{
rxdato=RCREG;

```

```

If (rxdato=='q')
{
flag2 = 1;
datos4[0]=rxdato;
dato_in=0;
RCIF=0;
do
{
goto4: if(RCIF)
{
dato_in++;
datos4[dato_in]=RCREG;

```

```

RCIF=0;
}
else

```

```

goto goto4;
}while(dato_in!=6);

```

```

dato_in= 0;
flag2 = 0;

```

```

}

If (rxdato=='Q')
{
flag2 = 1;
datos[0]=rxdato;
dato_in=0;
RCIF=0;
do
{
goto1: if(RCIF)
{
dato_in++;
datos[dato_in]=RCREG;
RCIF=0;
}
}
else
goto goto1;
}while(dato_in!=2);
dato_in= 0;
flag2 = 0;
}

```

```

If (rxdato=='E')
{
flag2 = 1;
datos2[0]=rxdato;
dato_in=0;
RCIF=0;
do
{
goto2: if(RCIF)
{
dato_in++;
datos2[dato_in]=RCREG;
RCIF=0;
}
}
else
goto goto2;
}while(dato_in!=2);
dato_in= 0;
flag2 = 0;
}

```

```

If (rxdato=='F')
{
flag2 = 1;
datos3[0]=rxdato;
dato_in=0;
RCIF=0;
do
{
goto3: if(RCIF)
{
dato_in++;
datos3[dato_in]=RCREG;

```

```

RCIF=0;
}
else
goto goto3;
}while(dato_in!=2);
dato_in= 0;
flag2 = 0;
}

If (rxdato=='e')
{
flag2 = 1;
dato1[0]=rxdato;
flag2 = 0;
}

If (rxdato=='s')
{
flag2 = 1;
dato2[0]=rxdato;
flag2 = 0;
}

If (rxdato=='t')
{
flag2 = 1;
dato3[0]=rxdato;
}

else
{
flag2 = 1;
goto checar;
}
}}

// FIN DE LA INTERRUPCION POR RECEPCION EN LA
USART *****//

void main()
{
output_low(PIN_B0);
output_high(PIN_B3);
output_low(PIN_D0);
output_low(PIN_D1);
output_low(PIN_D2);
output_low(PIN_D3);
output_low(PIN_D4);

setup_adc_ports( ALL_ANALOG );
setup_port_a(ALL_ANALOG);
setup_adc (adc_clock_internal);
setup_ccp1(CCP_PWM);
setup_timer_2(T2_DIV_BY_1, 255, 1);

habil_int:      enable_interrupts(global);
enable_interrupts(int_rda);

do{

}while(flag2 != 1);

if (datos[0]=='Q')
{
disable_interrupts(int_ext);
Digitalizador();
}

if (datos2[0]=='E')
{
disable_interrupts(int_ext);
carga();
manda_Home();
}

if (datos3[0]=='F')
{

disable_interrupts(int_ext);
Mueve();
}

if (datos4[0]=='q')
{
disable_interrupts(int_ext);
manda_cpu();
}

if (dato3[0]=='t')
{
disable_interrupts(int_ext);
datos4[1]=28;
datos4[4]=198;
manda_cpu();
}

if (dato1[0]=='e')
{
disable_interrupts(int_ext);
manda_Home();
}

if (dato2[0]=='s')
{
disable_interrupts(int_ext);
manda_Home();
}

datos[0]=0;
datos[1]=0;
datos[2]=0;

datos2[0]=0;
datos2[1]=0;
datos2[2]=0;

datos3[0]=0;
datos3[1]=0;
datos3[2]=0;

datos4[0]=0;
datos4[1]=0;
datos4[2]=0;
datos4[3]=0;
datos4[4]=0;
datos4[5]=0;
datos4[6]=0;

dato1[0]=0;
dato1[1]=0;
dato2[0]=0;
dato2[1]=0;
dato3[0]=0;
dato3[1]=0;

flag2=0;

```

```

rxdato=0;
goto habil_int;
}

/**SECUENCIA PARA PROGRAMACION POR GUIADO***/
/*******//
void Digitalizador()
{
int detener;
detener=0;

do{
set_adc_channel(0);
valor1=read_adc();

if(valor1==datos[1])
{
output_high(PIN_B3);
detener=1;
}
else
{

set_pwm1_duty(150);
output_low(PIN_B3);
}

if(valor1>datos[1])
output_high(PIN_B4);
if(valor1<datos[1])
output_low(PIN_B4);
}while(detener!=1);
}

void carga(){
int valor,detener;
detener=0;
while(detener!=1){
set_adc_channel(0);
valor1=read_adc();
Va=valor1;
detener=1;
}
}

void Mueve()
{
int detener;
detener=0;

do{
set_adc_channel(0);
valor1=read_adc();

if(valor1==Va)
{
output_high(PIN_B3);
detener=1;
}
else
{
set_pwm1_duty(150);
output_low(PIN_B3);
}

if(valor1>Va)
output_high(PIN_B4);

if(valor1<Va)
output_low(PIN_B4);
}while(detener!=1);
}

void manda_Home()
{
int detener;
detener=0;
do{
set_adc_channel(0);
valor1=read_adc();

if(valor1==128)
{
output_high(PIN_B3);
detener=1;
}
else
{
set_pwm1_duty(100);
output_low(PIN_B3);
}

if(valor1>128)
output_high(PIN_B4);

if(valor1<128)
output_low(PIN_B4);
}while(detener!=1);
}

/**SECUENCIA PARA PROGRAMACIÓN DE POSICIÓN */
/*******INICIAL Y POSICIÓN FINAL*****//

void manda_cpu()
{
int detener;
int detener1;
detener=0;
detener1=0;
do{
set_adc_channel(0);
valor1=read_adc();

if(valor1==datos4[1])
{
output_high(PIN_B3);
detener=1;
}
else
{
set_pwm1_duty(100);
output_low(PIN_B3);
}

if(valor1>datos4[1])
output_high(PIN_B4);

if(valor1<datos4[1])
output_low(PIN_B4);
}while(detener!=1);

while ( !input(PIN_D0) );
while ( !input(PIN_D1) );
}

```

```
while ( input(PIN_D3) );
output_high(PIN_D2);
manda_BraFin();
output_low(PIN_D2);
}
```

```
void manda_BraFin()
{
int detener;
detener=0;
do{
set_adc_channel(0);
valor1=read_adc();

if(valor1==datos4[4])
{
output_high(PIN_B3);
detener=1;

}
else
{
set_pwm1_duty(100);
output_low(PIN_B3);

}

}
```

```
if(valor1>datos4[4])
output_high(PIN_B4);
```

```
if(valor1<datos4[4])
output_low(PIN_B4);
}while(detener!=1);
}
```

**Código fuente del Programa para el microcontrolador\_2, 3, 4 y 5. Se utiliza la misma estructura solo se cambia la letra que llega de la PC, "R", por "S", para el tercer microcontrolador, para el cuarto se cambia por "T", y para el quinto se cambia por "U".**

```
//Programa que permite accionar el segundo motor.
Dependiendo del caracter que
//llega de la PC.
```

```
#include <16F877.h>
#fuses HS, NOWDT
#use delay(clock = 2000000)
#use rs232(baud=9600, xmit=PIN_C6, rcv=PIN_C7,
parity=N, bits=8)
#use i2c(Master, SDA = PIN_C4, SCL = PIN_C3, FAST)
#include <math.h>
```

```
//Registros de la usart:
#BYTE RCREG=0x1A
#BIT RCIF=0x0C.533
```

```
//Declaracion de Funciones
```

```
void Led();
void CalculosIni();
void CalculosFin();
void manda_cpu();
void manda_BraFin();
void manda_Home();
void Digitalizador();
void carga();
void Mueve();
```

```
//Declaracion de Variables
```

```
int datos[3]={0};
int datos2[3]={0};
int datos3[3]={0};
int datos4[7]={0};
int dato1[2]={0};
int dato2[2]={0};
int dato3[2]={0};
```

```
int rxdato = 0;
int flag2 = 0;
int dato_in = 0;
int Va=0;
```

```
//*****Interrupcion por recepcion de dato por
RS232 *****//
//*****//
*****//
```

```
#int_rda
void serial_isr()
{
```

```
disable_interrupts(global);
chechar: if(RCIF)
{
rxdato=RCREG;
```

```
If (rxdato=='q')
{
flag2 = 1;
datos4[0]=rxdato;
dato_in=0;
RCIF=0;
do
{
goto4: if(RCIF)
{
dato_in++;
datos4[dato_in]=RCREG;
RCIF=0;
}
else
goto goto4;
}while(dato_in!=6);
dato_in= 0;
flag2 = 0;
}
```

```
If (rxdato=='R')
{
flag2 = 1;
datos[0]=rxdato;
dato_in=0;
RCIF=0;
do
{
goto1: if(RCIF)
{
dato_in++;
datos[dato_in]=RCREG;
RCIF=0;
}
else
goto goto1;
```

```

}while(dato_in!=2);
dato_in= 0;
flag2 = 0;
}

If (rxdato=='E')
{
flag2 = 1;
datos2[0]=rxdato;
dato_in=0;
RCIF=0;
do
{
goto2:  if(RCIF)
{
dato_in++;
datos2[dato_in]=RCREG;
RCIF=0;
}
else
goto goto2;
}while(dato_in!=2);

dato_in= 0;
flag2 = 0;
}

If (rxdato=='F')
{
flag2 = 1;
datos3[0]=rxdato;
dato_in=0;
RCIF=0;
do
{
goto3:  if(RCIF)
{
dato_in++;
datos3[dato_in]=RCREG;
RCIF=0;
}
else
goto goto3;
}while(dato_in!=2);
dato_in= 0;
flag2 = 0;
}

If (rxdato=='e')
{
flag2 = 1;
dato1[0]=rxdato;
flag2 = 0;
}

If (rxdato=='s')
{
flag2 = 1;
dato2[0]=rxdato;
flag2 = 0;
}

If (rxdato=='t')
{
flag2 = 1;
dato3[0]=rxdato;
}

else
{
flag2 = 1;
goto checar;
}
}

//***** FIN DE LA INTERRUPCION POR RECEPCION
EN LA USART *****/

void main()
{
output_low(PIN_B0);
output_high(PIN_B3);
output_low(PIN_D0);
output_low(PIN_D1);
output_low(PIN_D2);
output_low(PIN_D3);

setup_adc_ports( ALL_ANALOG );
setup_port_a(ALL_ANALOG);

setup_adc (adc_clock_internal);
setup_ccp1(CCP_PWM);
setup_timer_2(T2_DIV_BY_1, 255, 1);

habil_int:      enable_interrupts(global);
enable_interrupts(int_rda);

do{

//restart_wdt();//*** Refresco al Perro guardian ***
}while(flag2 != 1);

if (datos[0]=='R')
{
disable_interrupts(int_ext);
Digitalizador();
}

if (datos2[0]=='E')
{
disable_interrupts(int_ext);
carga();
manda_Home();
}

if (datos3[0]=='F')
{
disable_interrupts(int_ext);
Mueve();
}

if (datos4[0]=='q')
{
disable_interrupts(int_ext);
manda_cpu();
}

if (dato3[0]=='t')
{

```

```

disable_interrupts(int_ext);
datos4[2]=78;
datos4[5]=198;
manda_cpu();
}

if (dato1[0]=='e')
{
disable_interrupts(int_ext);
manda_Home();
}

if (dato2[0]=='s')
{
disable_interrupts(int_ext);
manda_Home();
}

datos[0]=0;
datos[1]=0;
datos[2]=0;

datos2[0]=0;
datos2[1]=0;
datos2[2]=0;

datos3[0]=0;
datos3[1]=0;
datos3[2]=0;

datos4[0]=0;
datos4[1]=0;
datos4[2]=0;
datos4[3]=0;
datos4[4]=0;
datos4[5]=0;
datos4[6]=0;

dato1[0]=0;
dato1[1]=0;
dato2[0]=0;
dato2[1]=0;
dato3[0]=0;
dato3[1]=0;

flag2=0;
rxdato=0;

goto habil_int;
}

//*****SECUENCIA PARA PROGRAMACION
POR GUIADO*****//
//*****
*****//

void Digitalizador()
{
int detener;
detener=0;

do{
set_adc_channel(0);
valor1=read_adc();

if(valor1==datos[1])
{
output_high(PIN_B3);
detener=1;
}
else
{
set_pwm1_duty(255);
output_low(PIN_B3);
}

if(valor1>datos[1])
output_high(PIN_B4);
if(valor1<datos[1])
output_low(PIN_B4);
}while(detener!=1);

putc(valor1);
}

void carga(){
int valor,detener;
detener=0;
while(detener!=1){
set_adc_channel(0);
valor1=read_adc();
Va=valor1;

putc(Va);
detener=1;
}
}

void Mueve()
{
int detener;
detener=0;

do{
set_adc_channel(0);
valor1=read_adc();

if(valor1==Va)
{
output_high(PIN_B3);
detener=1;
}
else
{
set_pwm1_duty(255);
output_low(PIN_B3);
}

if(valor1>Va)
output_high(PIN_B4);
if(valor1<Va)
output_low(PIN_B4);
}while(detener!=1);

putc(valor1);
Va=0;
}

//*****SECUENCIA PARA MANDAR A
POSICIÓN DE HOME *****//
//*****
*****//

void manda_Home()

```

```

{
int detener;
detener=0;
do{
set_adc_channel(0);
valor1=read_adc();

if(valor1==208)
{
output_high(PIN_B3);
detener=1;
}
else
{
set_pwm1_duty(255);
output_low(PIN_B3);
}

if(valor1>208)
output_high(PIN_B4);

if(valor1<208)
output_low(PIN_B4);
}while(detener!=1);
}

//*****SECUENCIA PARA PROGRAMACIÓN
DE POSICIÓN *****//
//*****INICIAL Y POSICIÓN
FINAL *****//
void manda_cpu()
{

int detener;

int detener1;
detener=0;
detener1=0;
do{
set_adc_channel(0);
valor1=read_adc();

if(valor1==datos4[2])
{
output_high(PIN_B3);

detener=1;
}
else
{
set_pwm1_duty(255);
output_low(PIN_B3);
}

if(valor1>datos4[2])
output_high(PIN_B4);

if(valor1<datos4[2])
output_low(PIN_B4);
}while(detener!=1);

output_high(PIN_D0);
while ( !input(PIN_D3) );
output_low(PIN_D0);
manda_BraFin();

}

```

```

void manda_BraFin()
{
int detener;
detener=0;
do{
set_adc_channel(0);
valor1=read_adc();

if(valor1==datos4[5])
{
output_high(PIN_B3);
detener=1;
}
else
{
set_pwm1_duty(255);
output_low(PIN_B3);
}

if(valor1>datos4[5])
output_high(PIN_B4);

if(valor1<datos4[5])
output_low(PIN_B4);
}while(detener!=1);
}

```

#### Código fuente, Programa para el microcontrolador 6.

//Programa que permite accionar a un motor. Dependiendo del caracter que llega de la PC, realiza la funcion que le corresponde.

```

#include <16F877.h>
#fuses HS, NOWDT
#use delay(clock = 2000000)

#use rs232(baud=9600, xmit=PIN_C6, rcv=PIN_C7,
parity=N, bits=8)
#use i2c(Master, SDA = PIN_C4, SCL = PIN_C3, FAST)
#include <math.h>

//Registros de la usart:
#BYTE RCREG=0x1A
#BIT RCIF=0x0C.533

//Declaracion de Funciones

void Led();
void CalculosIni();
void CalculosFin();
void manda_cpu();
void manda_BraFin();
void manda_Home();
void Digitalizador();
void carga();
void Mueve();
void Abrir_Bajar();
void Cerrar_Subir();

//Declaracion de Variables
int datos3[]={0};
int datos2[3]={0};
int datos3[3]={0};
int datos4[7]={0};
int dato1[2]={0};
int dato2[2]={0};
int dato3[2]={0};

```

```
int dato4[2]={0};
int dato5[2]={0};
```

```
int rxdato = 0;
int flag2 = 0;
int dato_in = 0;
int valor1=0;
int Va=0;
```

```
//*****Interrupcion por recepcion de dato por
RS232 *****//
```

```
//*****//
```

```
#int_rda
void serial_isr()
{
disable_interrupts(global);
chechar: if(RCIF)
{
rxdato=RCREG;
```

```
If (rxdato=='q')
{
flag2 = 1;
datos4[0]=rxdato;
dato_in=0;
RCIF=0;
do
{
goto4: if(RCIF)
{
dato_in++;
datos4[dato_in]=RCREG;
RCIF=0;
}
else
goto goto4;
}while(dato_in!=6);
```

```
dato_in= 0;
flag2 = 0;
}
```

```
If (rxdato=='U')
{
flag2 = 1;
datos[0]=rxdato;
dato_in=0;
RCIF=0;
do
{
goto1: if(RCIF)
{
dato_in++;
datos[dato_in]=RCREG;
RCIF=0;
}
else
goto goto1;
}while(dato_in!=2);
dato_in= 0;
flag2 = 0;
}
```

```
If (rxdato=='E')
```

```
{
flag2 = 1;
datos2[0]=rxdato;
dato_in=0;
RCIF=0;
do
{
goto2: if(RCIF)
{
dato_in++;
datos2[dato_in]=RCREG;
RCIF=0;
}
else
goto goto2;
}while(dato_in!=2);
dato_in= 0;
flag2 = 0;
}
```

```
If (rxdato=='F')
{
flag2 = 1;
datos3[0]=rxdato;
dato_in=0;
RCIF=0;
do
{
goto3: if(RCIF)
{
dato_in++;
datos3[dato_in]=RCREG;
RCIF=0;
}
else
goto goto3;
}while(dato_in!=2);
dato_in= 0;
flag2 = 0;
}
```

```
If (rxdato=='A')
{
flag2 = 1;
dato4[0]=rxdato;
flag2 = 0;
}
```

```
If (rxdato=='C')
{
flag2 = 1;
dato5[0]=rxdato;
flag2 = 0;
}
```

```
If (rxdato=='e')
{
flag2 = 1;
dato1[0]=rxdato;
flag2 = 0;
}
```

```
If (rxdato=='s')
{
flag2 = 1;
```

```

dato2[0]=rxdato;
flag2 = 0;
}

if (rxdato=='t')
{
flag2 = 1;
dato3[0]=rxdato;
}

else
{
flag2 = 1;
goto checar;
}
}}

//***** FIN DE LA INTERRUPTCION POR RECEPCION
EN LA USART *****//

void main()
{
output_low(PIN_B0);
output_high(PIN_B3);
output_low(PIN_D0);
output_low(PIN_D1);
output_low(PIN_D2);
output_low(PIN_D3);
output_low(PIN_D6);
output_low(PIN_D7);

setup_adc_ports( ALL_ANALOG );
setup_port_a(ALL_ANALOG);
setup_adc (adc_clock_internal);
setup_ccp1(CCP_PWM);
setup_timer_2(T2_DIV_BY_1, 255, 1);

habil_int:      enable_interrupts(global);
enable_interrupts(int_rda);

do{
//restart_wdt();//*** Refresco al Perro guardian ***
}while(flag2 != 1);

if (datos[0]=='U')
{
disable_interrupts(int_ext);
Digitalizador();
}

if (datos2[0]=='E')
{
disable_interrupts(int_ext);
carga();
manda_Home();
}

if (datos3[0]=='F')
{
disable_interrupts(int_ext);
Mueve();
}

if (datos4[0]=='q')
{
disable_interrupts(int_ext);
manda_cpu();
}

if (dato3[0]=='t')
{
disable_interrupts(int_ext);
datos4[3]=128;
datos4[6]=98;
manda_cpu();
}

if (dato1[0]=='e')
{
disable_interrupts(int_ext);
manda_Home();
}

if (dato2[0]=='s')
{
disable_interrupts(int_ext);
manda_Home();
}

if (dato4[0]=='A')
{
disable_interrupts(int_ext);
Abrir_Bajar();
}

if (dato5[0]=='C')
{
disable_interrupts(int_ext);
Cerrar_Subir();
}

datos[0]=0;
datos[1]=0;
datos[2]=0;

datos2[0]=0;
datos2[1]=0;
datos2[2]=0;

datos3[0]=0;
datos3[1]=0;

datos3[2]=0;

datos4[0]=0;
datos4[1]=0;
datos4[2]=0;
datos4[3]=0;
datos4[4]=0;
datos4[5]=0;
datos4[6]=0;

dato1[0]=0;
dato1[1]=0;
dato2[0]=0;
dato2[1]=0;
dato3[0]=0;
dato3[1]=0;
dato4[0]=0;
dato5[1]=0;
dato5[0]=0;

```

```

dato5[1]=0;

flag2=0;
rxdato=0;

goto habil_int;
}

//*****SECUENCIA PARA PROGRAMACION
POR GUIADO*****//
//*****//

void Digitalizador()
{
int detener;
detener=0;

do{
set_adc_channel(0);
valor1=read_adc();

if(valor1==datos[1])
{
output_high(PIN_B3);
detener=1;
}
else
{
set_pwm1_duty(155);
output_low(PIN_B3);
}

if(valor1>datos[1])
output_high(PIN_B4);
if(valor1<datos[1])
output_low(PIN_B4);
}while(detener!=1);
}

void carga(){
int valor,detener;
detener=0;
while(detener!=1){
set_adc_channel(0);
valor1=read_adc();
Va=valor1;
detener=1;
}
}

void Mueve()
{
int detener;
detener=0;

do{
set_adc_channel(0);
valor1=read_adc();

if(valor1==Va)
{
output_high(PIN_B3);
detener=1;
}
else
{
set_pwm1_duty(155);
output_low(PIN_B3);
}
}

set_pwm1_duty(155);
output_low(PIN_B3);
}

if(valor1>Va)
output_high(PIN_B4);
if(valor1<Va)
output_low(PIN_B4);
}while(detener!=1);
Va=0;
}

//*****SECUENCIA PARA MANDAR A
POSICIÓN DE HOME *****//
//*****//

void manda_Home()
{
int detener;
detener=0;
do{
set_adc_channel(0);
valor1=read_adc();

if(valor1==248)
{
output_high(PIN_B3);
detener=1;
}
else
{
set_pwm1_duty(155);
output_low(PIN_B3);
}

if(valor1>248)
output_high(PIN_B4);

if(valor1<248)
output_low(PIN_B4);
}while(detener!=1);
}

//*****SECUENCIA PARA PROGRAMACIÓN
DE POSICIÓN *****//
//*****INICIAL Y POSICIÓN
FINAL*****//

void manda_cpu()
{
int detener;
int detener1;
detener=0;

detener1=0;
do{
set_adc_channel(0);
valor1=read_adc();

if(valor1==datos4[3])
{
output_high(PIN_B3);
detener=1;
}
else
{
set_pwm1_duty(155);
}
}
}

```

```

output_low(PIN_B3);
}

if(valor1>datos4[3])
output_high(PIN_B4);

if(valor1<datos4[3])
output_low(PIN_B4);
}while(detener!=1);

output_high(PIN_D0);
while ( !input(PIN_D3) );
output_low(PIN_D0);
manda_BraFin();
}

void manda_BraFin()
{
int detener;
detener=0;
do{
set_adc_channel(0);
valor1=read_adc();

if(valor1==datos4[6])
{
output_high(PIN_B3);
detener=1;
}
else
{
set_pwm1_duty(155);
output_low(PIN_B3);
}

if(valor1>datos4[6])
output_high(PIN_B4);

if(valor1<datos4[6])
output_low(PIN_B4);
}while(detener!=1);
}

//*****SECUENCIA PARA ABRIR PINZA O
CERRAR PINZA *****//

void Abrir_bajar()
{
output_low(PIN_D6);
output_high(PIN_D7);
while ( !input(PIN_D5) );
output_low(PIN_D7);
}

void Cerrar_Subir()
{
output_low(PIN_D7);

output_high(PIN_D6);
while ( !input(PIN_D4) );
output_low(PIN_D6);
}

```

Código fuente del Programa para Visual Basic.

```

*****
'Programa que permite mandar en código ASCII, valores a
los microcontroladores.
'para poder mover al brazo robótico de 6GDL.
*****
*****ROGRAMACION POR GUIADO*****
*****
'Instrucciones que accionan al motor_1 (primer grado de
libertad).

Private Sub Command1_Click(Index As Integer)
'DECLARACION DE VARIABLES PARA LA ENTRADA DE
DATOS
Dim XX1, YY1, ZZ1, XX2, YY2, ZZ2 As Double
Dim Valor, Aux, Mandar, P1, Home As Integer

XX1 = Val(Text1.Text)
YY1 = Val(Text2.Text)
Valor = Val(Label21.Caption)

Select Case Index

Case 0
Valor = 128
Mandar = 81
Case 1
Valor = Valor - 10
Mandar = 81
Case 2
Valor = Valor + 10
Mandar = 81
Case 3
Valor = Valor - 20
Mandar = 81
Case 4
Valor = Valor + 20
Mandar = 81
Case 5
Mandar = 69
Home = 127
Case 6
Mandar = 70
End Select

P1 = Abs(Int(Valor))

If P1 >= 255 Then
MsgBox "Posicion Maxima", vbCritical, "Ojo"
Exit Sub
End If

Aux = P1
Label21.Caption = Aux
Label20.Caption = Chr(Mandar)

MSComm1.Output = Chr(Mandar) & Chr(Aux) & Chr(Home)

End Sub

'Instrucción que ordena al brazo robotico a realizar
simulacion de taladrado.
Private Sub Command10_Click()
MSComm1.Output = "s"
End Sub

```

```
'Instruccion que ordena al brazo robotico a realizar la
trayectoria preestablecida
Private Sub Command11_Click()
MSComm1.Output = "t"
End Sub
```

```
'Instrucciones que accionan al motor_2 (segundo grado de
libertad).
Private Sub Command2_Click(Index As Integer)
'DECLARACION DE VARIABLES PARA LA ENTRADA DE
DATOS
Dim XX1, YY1, ZZ1, XX2, YY2, ZZ2 As Double
```

```
Dim Valor, Aux, Mandar, P1, Home As Integer
```

```
XX1 = Val(Text1.Text)
YY1 = Val(Text2.Text)
Valor = Val(Label22.Caption)
```

```
Select Case Index
Case 0
```

```
Valor = 128
Mandar = 82
Case 1
Valor = Valor - 10
Mandar = 82
Case 2
Valor = Valor + 10
Mandar = 82
Case 3
Valor = Valor - 20
Mandar = 82
Case 4
Valor = Valor + 20
Mandar = 82
```

```
End Select
```

```
P1 = Abs(Int(Valor))
```

```
If P1 >= 255 Then
MsgBox "Posicion Maxima", vbCritical, "Ojo"
Exit Sub
End If
```

```
Aux = P1
Label22.Caption = Aux
Label20.Caption = Chr(Mandar)
MSComm1.Output = Chr(Mandar) & Chr(Aux) & Chr(Home)
End Sub
```

```
Private Sub Command3_Click(Index As Integer)
'DECLARACION DE VARIABLES PARA LA ENTRADA DE
DATOS
Dim XX1, YY1, ZZ1, XX2, YY2, ZZ2 As Double
Dim Valor, Aux, Mandar, P1, Home As Integer
```

```
XX1 = Val(Text1.Text)
YY1 = Val(Text2.Text)
Valor = Val(Label23.Caption)
```

```
Select Case Index
Case 0
Valor = 208
Mandar = 83
Case 1
```

```
Valor = Valor - 10
Mandar = 83
Case 2
Valor = Valor + 10
Mandar = 83
Case 3
```

```
Valor = Valor - 20
Mandar = 83
Case 4
Valor = Valor + 20
Mandar = 83
```

```
End Select
```

```
P1 = Abs(Int(Valor))
```

```
If P1 >= 255 Then
MsgBox "Posicion Maxima", vbCritical, "Ojo"
Exit Sub
End If
```

```
Aux = P1
Label23.Caption = Aux
Label20.Caption = Chr(Mandar)
MSComm1.Output = Chr(Mandar) & Chr(Aux) & Chr(Home)
End Sub
```

```
Private Sub Command4_Click(Index As Integer)
'DECLARACION DE VARIABLES PARA LA ENTRADA DE
DATOS
Dim XX1, YY1, ZZ1, XX2, YY2, ZZ2 As Double
Dim Valor, Aux, Mandar, P1, Home As Integer
```

```
XX1 = Val(Text1.Text)
YY1 = Val(Text2.Text)
Valor = Val(Label24.Caption)
```

```
Select Case Index
Case 0
```

```
Valor = 128
Mandar = 84
Case 1
Valor = Valor - 10
Mandar = 84
Case 2
Valor = Valor + 10
Mandar = 84
Case 3
Valor = Valor - 20
Mandar = 84
Case 4
Valor = Valor + 20
Mandar = 84
End Select
```

```
P1 = Abs(Int(Valor))
```

```
If P1 >= 255 Then
MsgBox "Posicion Maxima", vbCritical, "Ojo"
Exit Sub
End If
```

```
Aux = P1
Label24.Caption = Aux
```

```
Label20.Caption = Chr(Mandar)
```

```
MSComm1.Output = Chr(Mandar) & Chr(Aux) & Chr(Home)
End Sub
```

```
Private Sub Command5_Click(Index As Integer)
'DECLARACION DE VARIABLES PARA LA ENTRADA DE
DATOS
Dim XX1, YY1, ZZ1, XX2, YY2, ZZ2 As Double
Dim Valor, Aux, Mandar, P1, Home As Integer
```

```
XX1 = Val(Text1.Text)
YY1 = Val(Text2.Text)
```

```
Valor = Val(Label25.Caption)
```

```
Select Case Index
```

```
Case 0
Valor = 128
Mandar = 85
Case 1
Valor = Valor - 10
Mandar = 85
Case 2
Valor = Valor + 10
Mandar = 85
Case 3
Valor = Valor - 20
Mandar = 85
Case 4
Valor = Valor + 20
Mandar = 85
```

```
End Select
```

```
P1 = Abs(Int(Valor))
```

```
If P1 >= 255 Then
MsgBox "Posicion Maxima", vbCritical, "Ojo"
Exit Sub
End If
```

```
Aux = P1
Label25.Caption = Aux
Label20.Caption = Chr(Mandar)
```

```
MSComm1.Output = Chr(Mandar) & Chr(Aux) & Chr(Home)
End Sub
```

```
Private Sub Command6_Click(Index As Integer)
'DECLARACION DE VARIABLES PARA LA ENTRADA DE
DATOS
Dim XX1, YY1, ZZ1, XX2, YY2, ZZ2 As Double
Dim Valor, Aux, Mandar, P1, Home As Integer
```

```
XX1 = Val(Text1.Text)
YY1 = Val(Text2.Text)
Valor = Val(Label26.Caption)
```

```
Select Case Index
Case 0
Valor = 128
Mandar = 86
Case 1
Valor = Valor - 10
```

```
Mandar = 86
```

```
Case 2
Valor = Valor + 10
```

```
Mandar = 86
Case 3
Valor = Valor - 20
Mandar = 86
Case 4
Valor = Valor + 20
Mandar = 86
End Select
```

```
P1 = Abs(Int(Valor))
```

```
If P1 >= 255 Then
MsgBox "Posición Máxima", vbCritical, "Ojo"
```

```
Exit Sub
End If
```

```
Aux = P1
Label26.Caption = Aux
Label20.Caption = Chr(Mandar)
```

```
MSComm1.Output = Chr(Mandar) & Chr(Aux) & Chr(Home)
End Sub
```

```
Private Sub Command7_Click(Index As Integer)
Select Case Index
Case 0
MSComm1.Output = "A"
Case 1
MSComm1.Output = "C"
End Select
```

```
End Sub
```

```
*****
****CALCULO DE LOS ANGULOS PARA POSICIONAR AL
BRAZO ROBOTICO EN UN PUNTO CARTEIANO*****
*****
```

```
Private Sub Command8_Click()
'DECLARACION DE VARIABLES PARA LA ENTRADA DE
DATOS
Dim XX1, YY1, ZZ1, XX2, YY2, ZZ2 As Double
*****
'DECLARACION DE VARIABLES PARA THETA 1A
Dim X2, Y2, R2, COST1, ARCAST1, GRADOST1, NUMT1,
V_FT1, V_FINT1 As Double
'DECLARACION DE VARIABLES PARA THETA 2A
Dim SUMT2, COSTA2, ARCASTA2, VA_T2, SUMAT2,
VA_2T2, RAIZT2, COSTB2, ARCASTB2 As Double
Dim NUMT2, V_FT2, V_FINT2, VB_T2, VB_2T2,
GRADOST2, COSENOT2 As Double
'DECLARACION DE VARIABLES PARA THETA 3A
Dim SUMT3, REST3, R2T3, L1DT3, L2DT3, SUMLT3,
LDT3, COCIENT3, COST3, ARCAST3 As Double
Dim GRADOST3, NUMT3, V_FT3, V_FINT3 As Double
*****
```

```
'DECLARACION DE VARIABLES PARA THETA 1B
Dim X2B, Y2B, R2B, COST1B, ARCAST1B, GRADOST1B,
NUMT1B, V_FT1B, V_FINT1B As Double
'DECLARACION DE VARIABLES PARA THETA 2B
Dim SUMT2B, COSTA2B, ARCASTA2B, VA_T2B,
SUMAT2B, VA_2T2B, RAIZT2B, COSTB2B, ARCASTB2B
As Double
```

Dim NUMT2B, V\_FT2B, V\_FINT2B, VB\_T2B, VB\_2T2B,  
GRADOST2B, COSENOT2B As Double

'DECLARACION DE VARIABLES PARA THETA 3B

Dim SUMT3B, REST3B, R2T3B, L1DT3B, L2DT3B,  
SUMLT3B, LDT3B, COCIENT3B, COST3B, ARCO3T3B As  
Double

Dim GRADOST3B, NUMT3B, V\_FT3B, V\_FINT3B As  
Double

\*\*\*\*\*

XX1 = Val(Text1.Text) 'valores de la posicion en X1  
YY1 = Val(Text2.Text) 'valores de la posicion en Y1  
ZZ1 = Val(Text3.Text) 'valores de la posicion en Z1

XX2 = Val(Text4.Text) 'valores de la posicion en X2  
YY2 = Val(Text5.Text) 'valores de la posicion en Y2  
ZZ2 = Val(Text6.Text) 'valores de la posicion en Z2

'VALORES DE CONSTANTES.

H = 30

L1 = 29  
L2 = 43.5

\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*CALCULO DE LAS VARIABLES ARTICULARES  
PARA LA PRIMERA POSICION\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*

'CALCULO DE Theta1

\*\*\*\*\*

X2 = XX1 \* XX1  
Y2 = YY1 \* YY1  
R2 = Sqr(X2 + Y2)  
COST1 = (XX1 / R2)

If YY1 = 0 Then  
V\_FINT1 = 128  
GRADOST1 = 0  
End If

If YY1 > 0 Then  
ARCO3T1 = Atn(-COST1 / Sqr(-COST1 \* COST1 + 1)) + 2 \*  
Atn(1)  
GRADOST1 = CInt(ARCO3T1 \* (180 / 3.141516))  
NUMT1 = Abs(GRADOST1 / 1.1764)  
V\_FT1 = NUMT1 + 128  
V\_FINT1 = Abs(CInt(V\_FT1))  
End If

If YY1 < 0 Then  
ARCO3T1 = Atn(-COST1 / Sqr(-COST1 \* COST1 + 1)) + 2 \*  
Atn(1)  
GRADOST1 = CInt(ARCO3T1 \* (180 / 3.141516))  
NUMT1 = Abs(GRADOST1 / 1.1764)  
V\_FT1 = 128 - NUMT1  
V\_FINT1 = Abs(CInt(V\_FT1))  
End If  
Label2.Caption = GRADOST1  
Label13.Caption = V\_FINT1

\*\*\*\*\*

'CALCULO DE Theta3

SUMT3 = X2 + Y2  
REST3 = ZZ1 - H  
R2T3 = REST3 \* REST3  
L1DT3 = L1 \* L1  
L2DT3 = L2 \* L2

SUMLT3 = L1DT3 + L2DT3

LDT3 = 2 \* L1 \* L2

COCIENT3 = SUMT3 + R2T3 - SUMLT3  
COST3 = COCIENT3 / LDT3  
ARCO3T3 = Atn(-COST3 / Sqr(-COST3 \* COST3 + 1)) + 2 \*  
Atn(1)

GRADOST3 = CInt(ARCO3T3 \* (180 / 3.141516))  
NUMT3 = Abs(GRADOST3 / 1.1764)

If ARCO3T3 > 0 Then  
V\_FT3 = 112 - NUMT3  
V\_FINT3 = Abs(CInt(V\_FT3))  
End If

If ARCO3T3 < 0 Then  
V\_FT3 = NUMT3 + 112  
V\_FINT3 = Abs(CInt(V\_FT3))  
End If  
Label4.Caption = GRADOST3  
Label15.Caption = V\_FINT3

\*\*\*\*\*

'CALCULO DE VALORES PARA Theta2

SUMT2 = Sqr(R2T3 + SUMT3)  
COSTA2 = R2 / SUMT2  
ARCO3T2 = Atn(-COSTA2 / Sqr(-COSTA2 \* COSTA2 +  
1)) + 2 \* Atn(1)  
VA\_T2 = L1 + L2 \* Cos(ARCO3T3)  
VA\_2T2 = VA\_T2 \* VA\_T2  
VB\_T2 = L1 \* Sin(ARCO3T3)  
VB\_2T2 = VB\_T2 \* VB\_T2  
SUMAT2 = VA\_2T2 + VB\_2T2  
RAIZT2 = Sqr(SUMAT2)  
COSTB2 = VA\_T2 / RAIZT2  
ARCO3T2 = Atn(-COSTB2 / Sqr(-COSTB2 \* COSTB2 +  
1)) + 2 \* Atn(1)  
COSENOT2 = ARCO3T2 - ARCO3T3  
GRADOST2 = CInt(COSENOT2 \* (180 / 3.141516))  
NUMT2 = Abs(GRADOST2 / 1.1764)

If COSENOT2 < 0 Then  
V\_FT2 = NUMT2 + 61  
V\_FINT2 = Abs(CInt(V\_FT2))  
End If

If COSENOT2 > 0 Then  
V\_FT2 = 61 - NUMT2  
V\_FINT2 = Abs(CInt(V\_FT2))  
End If

Label3.Caption = GRADOST2  
Label14.Caption = V\_FINT2

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*CALCULO DE LAS VARIABLES ARTICULARES  
PARA LA SEGUNDA POSICION\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

'CALCULO DE THETA1B

```
*****
X2B = XX2 * XX2
Y2B = YY2 * YY2
R2B = Sqr(X2B + Y2B)
COST1B = (XX2 / R2B)

If YY2 = 0 Then
V_FINT1B = 128
GRADOST1B = 0

End If

If YY2 > 0 Then
ARCOST1B = Atn(-COST1B / Sqr(-COST1B * COST1B +
1)) + 2 * Atn(1)
GRADOST1B = CInt(ARCOST1B * (180 / 3.141516))

NUMT1B = Abs(GRADOST1B / 1.1764)
V_FT1B = NUMT1B + 128
V_FINT1B = Abs(CInt(V_FT1B))
End If

If YY2 < 0 Then
ARCOST1B = Atn(-COST1B / Sqr(-COST1B * COST1B +
1)) + 2 * Atn(1)
GRADOST1B = CInt(ARCOST1B * (180 / 3.141516))
NUMT1B = Abs(GRADOST1B / 1.1764)
V_FT1B = 128 - NUMT1B
V_FINT1B = Abs(CInt(V_FT1B))
End If
Label6.Caption = GRADOST1B
Label16.Caption = V_FINT1B
```

'CALCULO DE Theta3

```
*****
SUMT3B = X2B + Y2B
REST3B = ZZ2 - H
R2T3B = REST3B * REST3B
L1DT3B = L1 * L1
L2DT3B = L2 * L2
SUMLT3B = L1DT3B + L2DT3B
LDT3B = 2 * L1 * L2
COCIENT3B = SUMT3B + R2T3B - SUMLT3B
COST3B = COCIENT3B / LDT3B
ARCOST3B = Atn(-COST3B / Sqr(-COST3B * COST3B +
1)) + 2 * Atn(1)
GRADOST3B = CInt(ARCOST3B * (180 / 3.141516))
NUMT3B = Abs(GRADOST3B / 1.1764)

If ARCO3B > 0 Then
V_FT3B = 112 - NUMT3B
V_FINT3B = Abs(CInt(V_FT3B))
End If

If ARCO3B < 0 Then
V_FT3B = NUMT3B + 112
V_FINT3B = Abs(CInt(V_FT3B))
End If
Label8.Caption = GRADOST3B
Label18.Caption = V_FINT3B
```

'CALCULO DE VALORES PARA Theta2

```
SUMT2B = Sqr(R2T3B + SUMT3B)
COSTA2B = R2B / SUMT2B
ARCOSTA2B = Atn(-COSTA2B / Sqr(-COSTA2B *
COSTA2B + 1)) + 2 * Atn(1)
VA_T2B = L1 + L2 * Cos(ARCOST3B)
VA_2T2B = VA_T2B * VA_T2B
VB_T2B = L1 * Sin(ARCOST3B)
VB_2T2B = VB_T2B * VB_T2B
SUMAT2B = VA_2T2B + VB_2T2B
RAIZT2B = Sqr(SUMAT2B)
COSTB2B = VA_T2B / RAIZT2B

ARCOSTB2B = Atn(-COSTB2B / Sqr(-COSTB2B *
COSTB2B + 1)) + 2 * Atn(1)
COSENOT2B = ARCOA2B - ARCOB2B
GRADOST2B = CInt(COSENOT2B * (180 / 3.141516))
NUMT2B = Abs(GRADOST2B / 1.1764)

If COSENOT2B < 0 Then
V_FT2B = NUMT2B + 61
V_FINT2B = Abs(CInt(V_FT2B))
End If

If COSENOT2B > 0 Then
V_FT2B = 61 - NUMT2B
V_FINT2B = Abs(CInt(V_FT2B))
End If

Label7.Caption = GRADOST2B
Label17.Caption = V_FINT2B

MSComm1.Output = "q" & Chr(V_FINT1) & Chr(V_FINT2) &
Chr(V_FINT3) & Chr(V_FINT1B) & Chr(V_FINT2B) &
Chr(V_FINT3B)
End Sub
*****
'Instrucción que posiciona al brazo robotico en Home
Private Sub Command9_Click()
MSComm1.Output = "e"
End Sub

Private Sub Form_Load()

MSComm1.CommPort = 1 'COM1
MSComm1.Settings = "9600,N,8,1" '9600 baud, Sin
Paridad, 8 bits
MSComm1.RThreshold = 1 'Interrupción por
Recepción
MSComm1.InputLen = 1 'Datos a recibir para
interrumpir
If MSComm1.PortOpen = False Then MSComm1.PortOpen
= True 'Abre el puerto si está cerrado

End Sub

Private Sub MSComm1_OnComm()
If MSComm1.CommEvent = comEvReceive Then ' si el
evento es recibido entonses
RReg = Asc(MSComm1.Input) 'la variable rreg =
a la entrada
RichTextBox1.Text = RReg
'muestra el valor en un te
End If
End Sub
```